

**UNIVERSIDADE DE LISBOA
INSTITUTO DE GEOGRAFIA E ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO**



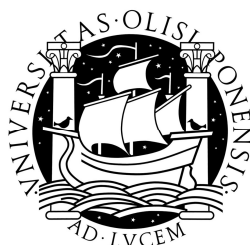
***Modelação da Susceptibilidade à Rotura e Propagação
de Desabamentos na Arrábida***

JOSÉ ANTÓNIO CASTANHEIRA PRESAS

**Dissertação de Mestrado em Geografia Física e Ordenamento do
Território**

2012

**UNIVERSIDADE DE LISBOA
INSTITUTO DE GEOGRAFIA E ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO**



***Modelação da Susceptibilidade à Rotura e Propagação
de Desabamentos na Arrábida***

JOSÉ ANTÓNIO CASTANHEIRA PRESAS

Dissertação orientada pelo Professor Doutor José Luís Zêzere

Mestrado em Geografia Física e Ordenamento do Território

2012

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE GERAL	I
ÍNDICE DE FIGURAS	IV
ÍNDICE DE TABELAS	VII
AGRADECIMENTOS	X
RESUMO	XI
ABSTRACT	XII
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 1 – A INSTABILIDADE DE VERTENTES NA LITERATURA CIENTÍFICA	5
1 – Os desabamentos no contexto dos movimentos de vertente	5
2 – Os factores dos desabamentos	8
3 – A modelação de desabamentos	10
3.1 – Principais condicionantes do processo de modelação de desabamentos	12
3.2 – Métodos utilizados na modelação de desabamentos	13
3.3 – Programas de modelação de desabamentos	15
CAPÍTULO 2 – ENQUADRAMENTO DA ÁREA DE ESTUDO	17
1 – A Cadeia da Arrábida	17
1.1 – Posição Geográfica	17
1.2 – Estruturas tectónicas e litologia	18
1.3 – Orografia	20
2 – Localização e abrangência territorial da área de estudo	21

CAPÍTULO 3 – INVENTÁRIO DE MOVIMENTOS DE VERTENTE E BASES CARTOGRÁFICAS	24
1 – Delimitação da área de estudo	24
2 – Inventário de movimentos de vertente	26
3 – Validação do inventário de fontes de desabamentos	29
4 – Bases cartográficas e modelo conceptual de pré-processamento de variáveis	31
4.1 – A variável dependente	33
4.2 – As variáveis independentes	34
CAPÍTULO 4 – MODELAÇÃO, VALIDAÇÃO E ANÁLISE DA CARTOGRAFIA DE SUSCEPTIBILIDADE À OCORRÊNCIA DE DESABAMENTOS	40
1 – A susceptibilidade à ocorrência de movimentos de vertente	40
2 – Integração, modelação e validação da cartografia de susceptibilidade à rotura por desabamento	43
2.1 – Procedimento metodológico – 1ª Fase: Avaliação do grau de ajuste do modelo de susceptibilidade	45
2.2 – Procedimento metodológico – 2ª Fase: Avaliação da capacidade preditiva dos modelos de susceptibilidade	48
2.3 – Procedimento metodológico – 3ª Fase: Análise sensitiva dos factores de predisposição	50
3 – Factores condicionantes dos desabamentos	52
3.1 – Declive	52
3.2 – Exposição das vertentes	54
3.3 – Curvatura transversal de vertentes (CURVA_T)	55
3.4 – Curvatura das vertentes em perfil (CURVA_P)	57
3.5 – Litologia	58
3.6 – Ocupação do solo	60
4 – Índices Accountability e Reliability	62
5 – Cartografia de susceptibilidade à ocorrência de desabamentos	64

5.1 – Modelos de susceptibilidade	65
5.1.1 – Modelos de susceptibilidade do grupo total de fontes (GTF)	66
5.1.2 – Modelos de susceptibilidade produzidos para o subgrupo de fontes (SG_1)	68
5.1.3 – Modelos de susceptibilidade produzidos para o subgrupo de fontes (SG_2)	70
5.2 – Determinação dos melhores modelos de susceptibilidade	72
5.3 – Classificação dos modelos de susceptibilidade	74
6 – Discussão de resultados	78
CAPÍTULO 5 – MODELAÇÃO, VALIDAÇÃO E ANÁLISE DA CARTOGRAFIA DE SUSCEPTIBILIDADE À PROPAGAÇÃO DE DESABAMENTOS	82
1 – Modelação da susceptibilidade à propagação de desabamentos	82
2 – O método CONEFALL	83
3 – Metodologia utilizada para a modelação das propagações de desabamentos	86
3.1 - Definição de áreas de teste	89
3.2 – Variáveis de Entrada	92
4 – Resultados e discussão	92
4.1 – Área de teste 1	92
4.2 – Área de teste 2	97
4.3 – Área de teste 3	104
4.4 – Área de teste 4	111
4.5. Síntese	117
CONCLUSÃO	123
BIBLIOGRAFIA	126

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Localização da Arrábida no contexto da Bacia Lusitaniana.	18
Figura 2.2 – Esboço morfológico da Arrábida, por S. Daveau e O. Ribeiro.	20
Figura 2.3 – Localização e limites da área de estudo.	22
Figura 3.1 – Concelhos da Península de Setúbal e limites da área de estudo.	25
Figura 3.2 – Exemplos de delimitação na inventariação.	28
Figura 3.3 – Inventário de ocorrências de desabamentos registadas na área de estudo.	29
Figura 3.4 – Exemplos de fontes e de depósitos de desabamentos na Arrábida.	30
Figura 3.5 – Distribuição espacial das fontes de desabamentos na Arrábida.	31
Figura 3.6 – Modelo conceptual utilizado no pré-processamento das variáveis.	33
Figura 4.1 – Modelo conceptual da modelação e validação da cartografia de susceptibilidade à rotura por desabamentos.	44
Figura 4.2 – 1ª Fase da modelação da cartografia de susceptibilidade à ocorrência de desabamentos.	45
Figura 4.3 – Partição aleatória do inventário de fontes de desabamentos em dois subgrupos (SG_1 e SG_2) e a sua distribuição espacial na área de estudo.	49
Figura 4.4 – 2ª fase da modelação e validação da cartografia de susceptibilidade à ocorrência de desabamentos, com a partição do inventário de fontes.	50
Figura 4.5 – 3ª Fase da modelação e validação da cartografia de susceptibilidade à ocorrência de desabamentos, com a determinação das variáveis mais importantes a partir dos índices Accountability e Reliability.	51
Figura 4.6 – Valores de VI e área relativa das classes da variável Declive.	53
Figura 4.7 – Valores de VI e área relativa das classes da variável Exposição das vertentes.	55
Figura 4.8 – Valores de VI e área relativa das classes da Curvatura transversal das Vertentes.	56
Figura 4.9 – Valores de VI e área relativa das classes da variável Curvatura de Vertentes em Perfil.	58
Figura 4.10 – Valores de VI e área relativa das classes da variável Litologia.	60

Figura 4.11 – Sobreposição das fontes de desabamentos às áreas de Tecido Urbano representadas no nível 2 da cartografia COS 07.	61
Figura 4.12 – Valores de VI e área relativa das classes da variável Ocupação do solo.	62
Figura 4.13 – Modelos de susceptibilidade e curvas de sucesso dos modelos GTF (A), GTF_DCL (B) e GTF_PTE (C).	67
Figura 4.14 – Modelos de susceptibilidade à ocorrência de desabamentos e curvas de sucesso e de predição dos modelos SG_1 (A), SG_1_DLC (B) e SG_1_EPT (C).	70
Figura 4.15 – Modelos de susceptibilidade à ocorrência de desabamentos e curvas de sucesso e de predição dos modelos SG_2 (A), SG_2_DEC (B) e SG_2_LPT (C).	72
Figura 4.16 – Modelos de susceptibilidade à ocorrência de desabamentos seleccionados para classificação, GTF (A), SG_1 (B) e SG_2 (C).	73
Figura 4.17 – Classificação qualitativa da susceptibilidade do modelo GTF.	75
Figura 4.18 – Classificação qualitativa da susceptibilidade do modelo SG_1.	76
Figura 4.19 – Classificação qualitativa da susceptibilidade do modelo SG_2.	77
Figura 5.1 – Menu e opções do CONEFALL 10.	87
Figura 5.2 – Especificações geométricas do cone.	87
Figura 5.3 – Distribuição espacial das áreas teste na área de estudo.	90
Figura 5.4 – Distribuição espacial das vertentes com declive superior a 25° e localização das áreas de teste.	91
Figura 5.5 – Modelos de propagação de desabamentos associados a ângulos de alcance entre 12.5° e 15.5° na área teste 1.	93
Figura 5.6 – Distribuição relativa da área de depósito, pelas classes de susceptibilidade e por ângulo de alcance na área teste 1.	95
Figura 5.7 – Distribuição relativa acumulada da área de depósito, pelas classes de susceptibilidade e por ângulo de alcance na área teste 1.	96
Figura 5.8 – Modelos de propagação de desabamentos associados a ângulos de alcance entre 24° e 27° na área teste 2.	98
Figura 5.9 – Distribuição relativa da área de depósito, pelas classes de susceptibilidade e por ângulo de alcance na área teste 2.	101
Figura 5.10 – Distribuição relativa acumulada da área de depósito, pelas classes de susceptibilidade e por ângulo de alcance na área teste 2.	101
Figura 5.11 – Distribuição relativa das áreas de blocos, pelas classes de susceptibilidade e por ângulo de alcance na área teste 2.	102

Figura 5.12 – Distribuição relativa acumulada das áreas de blocos, pelas classes de susceptibilidade e por ângulo de alcance na área teste 2.	103
Figura 5.13 – Modelos de propagação de desabamentos associados a ângulos de alcance entre 17° e 20° na área teste 3.	105
Figura 5.14 – Distribuição relativa das áreas de depósito, pelas classes de susceptibilidade e por ângulo de alcance na área teste 3.	108
Figura 5.15 – Distribuição relativa acumulada da área de depósito, pelas classes de susceptibilidade e por ângulo de alcance na área teste 3.	109
Figura 5.16 – Distribuição relativa das áreas de blocos, pelas classes de susceptibilidade e por ângulo de alcance na área teste 3.	109
Figura 5.17 – Distribuição relativa acumulada das áreas de blocos, pelas classes de susceptibilidade e por ângulo de alcance na área teste 3.	110
Figura 5.18 – Modelos de propagação de desabamentos associados a ângulos de alcance entre 17° e 20° na área teste 4.	112
Figura 5.19 – Distribuição relativa das áreas de depósito, pelas classes de susceptibilidade e por ângulo de alcance na área teste 4.	114
Figura 5.20 – Distribuição relativa acumulada da área de depósito, pelas classes de susceptibilidade e por ângulo de alcance na área teste 4.	115
Figura 5.21 – Distribuição relativa das áreas de blocos, pelas classes de susceptibilidade e por ângulo de alcance na área teste 4.	115
Figura 5.22 – Distribuição relativa acumulada das áreas de blocos, pelas classes de susceptibilidade e por ângulo de alcance na área teste 4.	116
Figura 5.23 – Distribuição de blocos de conglomerado na área de teste 1.	118
Figura 5.24 – Modelo de susceptibilidade à propagação de desabamentos na área de teste 1 (ângulo de alcance de 13°).	119
Figura 5.25 – Modelo de susceptibilidade à propagação de desabamentos na área de teste 2 (ângulo de alcance de 24.5°).	120
Figura 5.26 – Modelo de susceptibilidade à propagação de desabamentos na área de teste 3 (ângulo de alcance de 17°).	121
Figura 5.27 – Modelo de susceptibilidade à propagação de desabamentos na área de teste 4 (ângulo de alcance de 17.5°).	122

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Distribuições absolutas e relativas por concelho na área de estudo.	23
Tabela 3.1 – Inventário de desabamentos sobre ortofotomapa e pré-validado.	27
Tabela 3.2 – Inventário de desabamentos sobre ortofotomapa, pré-validado e validado no campo.	30
Tabela 3.3 – Bases cartográficas utilizadas.	32
Tabela 3.4 – Classificação das unidades de ocupação de solo.	36
Tabela 3.5 – Classificação das unidades Litológicas.	37
Tabela 3.6 – Bases cartográficas classificadas e prontas para integração e projecto SIG.	38
Tabela 4.1 – Classificação, área absoluta e relativa das classes da variável Declive e respectivos valores de VI.	53
Tabela 4.2 – Classificação, área absoluta e relativa das classes da variável Exposição das vertentes e respectivos valores de VI.	54
Tabela 4.3 – Classificação, área absoluta e relativa das classes da variável Curvatura Transversal de Vertentes e respectivos valores de VI.	56
Tabela 4.4 – Classificação, área absoluta e relativa das classes da variável Curvatura de Vertentes em Perfil e respectivos valores de VI.	57
Tabela 4.5 – Classificação, área absoluta e relativa das classes da variável Litologia e respectivos valores de VI.	59
Tabela 4.6 – Classificação, área absoluta e relativa das classes da variável ocupação do solo e respectivos valores de VI.	61
Tabela 4.7 – Valores dos índices Accountability e Reliability para o grupo (GTF).	63
Tabela 4.8 – Valores dos índices Accountability e Reliability para o subgrupo (SG_1).	63
Tabela 4.9 – Valores dos índices Accountability e Reliability para o subgrupo (SG_2).	63
Tabela 4.10 – Codificação e descrição dos modelos de susceptibilidade.	65

Tabela 4.11 – Modelos de susceptibilidade produzidos a partir do grupo GTF e AAC das respectivas taxas de sucesso.	66
Tabela 4.12 – Modelos de susceptibilidade produzidos a partir do subgrupo (SG_1) e AAC das respectivas taxas de sucesso e predição.	68
Tabela 4.13 – Modelos de susceptibilidade produzidos a partir do subgrupo (SG_2) e AAC das respectivas taxas de sucesso e predição.	71
Tabela 4.14 – Síntese das AAC dos modelos de susceptibilidade produzidos a partir do grupo total de fontes e dos subgrupos de fontes (SG_1 e SG_2).	73
Tabela 4.15 – Relação entre fontes de desabamentos correctamente identificadas (%) e área de estudo classificada como susceptível por ordem decrescente (%) para as taxas de sucesso e predição dos modelos escolhidos.	79
Tabela 4.16 – Representatividade das classes de susceptibilidade do modelo GTF na área de estudo e percentagem de movimentos validados pela taxa de sucesso.	79
Tabela 4.17 – Representatividade das classes de susceptibilidade do modelo SG_1 na área de estudo e percentagem de movimentos validados pelas taxas de sucesso e predição.	80
Tabela 4.18 – Representatividade das classes de susceptibilidade do modelo SG_2 na área de estudo e percentagem de movimentos validados pela taxa de sucesso e pela taxa de predição.	81
Tabela 5.1 – Dimensão das áreas de teste (m ²).	90
Tabela 5.2 – Distribuição absoluta e relativa da área de estudo por limiar de declive.	91
Tabela 5.3 – Distribuição absoluta e relativa das classes de susceptibilidade e resultados da tabulação com as áreas de depósito por ângulo de alcance, na área de teste 1.	94
Tabela 5.4 – Distribuição relativa dos depósitos de desabamento por ângulo de alcance e por classe de susceptibilidade na área de teste 1.	96
Tabela 5.5 – Distribuição absoluta e relativa das classes de susceptibilidade e resultados da tabulação com as áreas de depósito e áreas de blocos por ângulo de alcance na área teste 2.	99
Tabela 5.6 – Distribuição relativa dos depósitos e dos blocos desabados por ângulo de alcance e por classe de susceptibilidade na área de teste 2.	103

Tabela 5.7 – Distribuição absoluta e relativa das classes de susceptibilidade e resultados da tabulação com as áreas de depósito e áreas de blocos por ângulo de alcance na área teste 3. 107

Tabela 5.8 – Distribuição relativa dos depósitos e dos blocos desabados por ângulo de alcance e por classe de susceptibilidade na área de teste 3. 111

Tabela 5.9 – Distribuição absoluta e relativa das classes de susceptibilidade e resultados da tabulação com as áreas de depósito e áreas de blocos por ângulo de alcance na área teste 4. 113

Tabela 5.10 – Distribuição relativa dos depósitos e dos blocos desabados por ângulo de alcance e por classe de susceptibilidade na área de teste 4. 117

Tabela 5.11 – Distribuição dos depósitos e dos blocos desabados por classe de susceptibilidade e por ângulo de alcance mais adequado para cada área teste. 117

AGRADECIMENTOS

À minha família que sempre me apoiou desde do início do percurso académico e sempre soube compreender a minha ausência.

À Sandra, à Miriam e ao Guilherme, que me aturaram nos períodos de maior pressão e lidaram com a situação da melhor forma que puderam.

Ao Dr. António Bem, meu chefe nos Serviços Municipais de Água e Saneamento de Almada, principal responsável pelo incentivo à minha entrada na vida Académica.

Ao Professor Doutor José Luís Zêzere, pela amizade demonstrada que vai muito para além da relação entre docente e discente, pela orientação sempre focada na obtenção de resultados fundamentados, na formação e pelo entusiasmo que esta temática lhe desperta e na capacidade de transmissão dessa paixão durante as cadeiras por ele leccionadas.

Ao Dr. Ricardo Garcia, pela constante disponibilidade e pela enorme ajuda disponibilizada durante varias fases deste trabalho.

Ao restante grupo de docentes do IGOT, que numa ou noutra fase, contribuíram para a minha formação o que possibilitou a minha chegada a este nível.

Aos meus colegas formação que passaram estes cinco anos da minha vida e pelos quais passamos algumas contrariedades, mas sempre soubemos lidar com as mesmas num espírito de entreajuda e partilha.

Ao IGOT, como instituição no seu todo, pelo acolhimento e pela formação de excelência que proporciona aos seus alunos.

Ao meu Pai, que infelizmente não me pode assistir na altura que mais falta me fazia, mas sei que esteja ele onde estiver certamente sentirá um grande orgulho.

À minha Mãe, responsável pela minha formação enquanto pessoa integra e responsável, e que sempre me compreendeu e sempre aceitou os meus defeitos porque acreditava nas minhas qualidades.

A nós e aos que gostam de nós,

RESUMO

Na presente dissertação foi desenvolvido um estudo relacionado com a instabilidade de vertentes na Serra da Arrábida (Península de Setúbal), focado nos desabamentos, sob a forma de queda de blocos rochosos e numa área aproximada de 117.5 km². Todos os procedimentos foram desenvolvidos em ambiente de Sistemas de Informação Geográfica.

Foram definidos dois objectivos específicos: (i) análise da susceptibilidade à ocorrência de desabamentos: através da criação de um inventário de movimentos de vertente e da utilização de seis variáveis explicativas foram aplicados os procedimentos necessários à utilização do método do Valor Informativo, o que possibilitou a criação de nove modelos de susceptibilidade; (ii) análise da susceptibilidade à propagação dos desabamentos: com base nos resultados obtidos em (i) foram definidas quatro áreas de teste onde se procedeu à modelação da propagação dos desabamentos a partir das fontes, recorrendo ao software CONEFALL 1.0 e utilizando duas variáveis, o Modelo Numérico de Elevação, que contém as características morfológicas das áreas de teste, e as fontes de desabamentos inventariadas e/ou determinadas a partir da localização dos blocos e dos depósitos desabados. O CONEFALL assenta no Ângulo da Linha de Energia e implica que sejam determinados ângulos de alcance para cada área de teste. Para tal, foram definidos ângulos mínimos e máximos com variações 0.5°, com vista à determinação do ângulo que gera o melhor ajustamento entre a classificação da susceptibilidade determinada com base nas áreas de propagação e a distribuição dos blocos e/ou depósitos de desabamento reconhecidos por foto interpretação e trabalho de campo. Deste modo, foram criados sete modelos de propagação para cada uma das áreas de teste e obtiveram-se as densidades de trajectórias e respectivas áreas de propagação.

Os resultados obtidos e a modelação em duas fases distintas permitiu identificar “onde” os desabamentos poderão ocorrer e “até onde” este se poderão propagar.

PALAVRAS-CHAVE: Arrábida; Desabamentos; Modelação; Susceptibilidade; Propagação.

ABSTRACT

In this thesis a study related to the slope instability focused on rockfalls was developed for the Arrábida mountain (117.5 km²) located in the Setúbal Peninsula. All the procedures were developed in Geographic Information Systems.

Two main specific objectives were defined: (i) the assessment of rockfall rupture susceptibility; by creating a rockfall inventory and using six explanatory variables. The Information Value method was used to weighted variable classes and nine rockfall susceptibility models were produced covering the entire study area; (ii) the assessment of rockfall propagation: based on the results obtained in (i), four test areas were defined, where the procedures to model the propagation of the rockfalls from the departure zone (sources) were applied. The software *CONEFALL 1.0* was selected to model rockfall propagation by considering two variables: the Digital Elevation Model, which contains the morphological characteristics of the test areas, and the sources of rockfalls inventoried. The inventoried rockfall blocks and deposits were used to validate the results.

The method CONEFALL is based on Line of Energy Angle and it is mandatory that a range of angles of reach are defined for each test area. Therefore, minimum and maximum angles were defined with variation of 0.5° with the objective to determine which angles allow the best adjustment between susceptibility classes ranked on the propagation areas and the distribution of the rockfall blocks and/or deposits. Seven rockfall propagation models were built for each test areas allowing the definition of paths and propagation areas.

The final results of rockfall modeling in two distinct phases allow us to identify "where" future rockfalls may occur and "how far" they may propagate.

KEYWORDS: Arrábida; Rockfalls; Modelling; Susceptibility; Propagation.

INTRODUÇÃO

De um ponto de vista filosófico, a exposição aos perigos naturais e o seu controlo remonta à pré-história, com as primeiras ocupações humanas e os ensinamentos que foram sendo adquiridos por força dos acontecimentos. Com o desenvolvimento das Ciências, os fenómenos naturais foram progressivamente sendo explicados e fundamentados com base em leis físicas e em relações empíricas. Contudo, apesar de todos os Séculos de evolução, ainda hoje persistem situações de total desconhecimento do funcionamento de processos perigosos e do risco que lhes está associado, uma vez que nem todas as áreas do mundo estão no mesmo patamar de informação e desenvolvimento científico. Não está dentro do âmbito desta dissertação discutir as questões teóricas que conduziram a esta realidade, mas sim enquadrar a situação actual, nomeadamente no caso Português e, particularmente, o caso da área de estudo.

Pese embora a crescente importância atribuída internacionalmente aos desabamentos, o que é confirmado pela profusão da literatura especializada, existem ainda situações onde este tipo de processo de instabilidade de vertentes é encarado como um problema de menor gravidade face a outros que têm um impacto, se não maior, pelo menos mais visível e mais frequente, como por exemplo as cheias e/ou as inundações.

Partindo do princípio de que os desabamentos correspondem a um dos tipos de manifestação de instabilidade em vertentes, entende-se que a análise da susceptibilidade à sua ocorrência corresponde à primeira abordagem em termos preventivos. Contudo, a identificação das áreas mais susceptíveis não deve ser considerada suficiente, especialmente se nestas existirem elementos expostos. A pertinência do tema advém do facto dos fenómenos relacionados com a instabilidade de vertentes representarem cada vez mais uma preocupação dos agentes com responsabilidade no ordenamento, no planeamento e na gestão do território. No entanto, apesar da mediatização deste tipo de fenómenos, quase sempre de forma trágica, verifica-se que existe algum desconhecimento e, por vezes, a desvalorização

do perigo, quer seja por quem tem responsabilidade na gestão do território, quer seja por parte de quem nele vive e desenvolve as suas actividades.

A profilaxia, no caso, passa por um diagnóstico correcto, baseado no princípio de que as mesmas causas podem produzir os mesmos efeitos. Deste modo, as medidas a tomar serão tanto mais eficazes quanto mais rigorosa for a avaliação das causas e das consequências da ocorrência deste tipo de fenómeno.

O conceito de susceptibilidade é aqui entendido como o da predisposição do território para experienciar algum tipo de fenómeno perigoso [desabamento], pelas suas características intrínsecas (*e.g.* geologia, geomorfologia), às quais se juntam as intervenções antrópicas, que podem assumir um papel determinante quando feitas de forma desregulada e sem conhecimento técnico.

Na presente dissertação são definidas as metodologias de abordagem aos objectivos e são determinadas as técnicas necessárias ao seu desenvolvimento, nomeadamente através dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG). As ferramentas SIG são bastante úteis na avaliação da susceptibilidade uma vez que são fáceis de utilizar e contribuem para a standardização de procedimentos metodológicos e analíticos, contribuindo para a produção de resultados objectivos e reproduzíveis.

Esta dissertação tem como objectivo fundamental a modelação da susceptibilidade à rotura e propagação de desabamentos. A área de estudo corresponde à Serra da Arrábida, pequena montanha contemporânea da fase bética da orogenia alpina, situada no sector meridional da Península de Setúbal.

O desenvolvimento do estudo implicou uma fase teórica de recolha e leitura de bibliografia relacionada com o tema, os métodos, as técnicas e as ferramentas, nomeadamente informáticas, utilizadas em estudos semelhantes, ainda que em contextos diferentes, o que remeteu para a necessidade de realizar um trabalho exaustivo de síntese da bibliografia disponível. A disseminação de inúmeras metodologias aplicadas e aplicáveis tornou o mesmo ainda mais difícil de realizar. A aplicação de diferentes modelos em diferentes contextos geográficos implicou a análise de documentos produzidos e publicados um pouco por todo o mundo. As abordagens são frequentemente diferentes e os resultados são poucas vezes coincidentes. O princípio de modelação assenta na simulação que, por sua vez, recorre

a dados quantitativos e a dados qualitativos que têm que sofrer transformações para serem utilizados nas abordagens numéricas. Não existe consenso nas metodologias mais eficazes, nem no tipo ou na quantidade de variáveis a utilizar, existindo até situações onde foi possível demonstrar que o aumento do número de variáveis influencia de forma negativa os resultados. O facto de existirem tantos algoritmos para modelação de áreas de propagação, de trajectórias e de cálculo de distâncias é, por si só, um reflexo da falta de uniformização dos modelos.

Todo o trabalho desenvolvido assentou no inventário de movimentos de vertente, sendo que o rigor aplicado na sua criação reflecte-se nos resultados finais. Foi a partir do inventário que foram aplicados os métodos e as técnicas seleccionadas. Se em termos de metodologias de modelação e validação da susceptibilidade à ocorrência de movimentos em vertente a situação está relativamente bem resolvida, o mesmo não se pode afirmar no que respeita à modelação das trajectórias e das áreas de propagação. No caso de Portugal, foi encontrado um documento dedicado à temática da modelação das propagações «Modelação de processos de queda de blocos em vertentes na região de Alvaiázere; dois estudos caso» (Santos e Tavares, 2010), o que pode ser visto segundo duas perspectivas: por um lado, que o trabalho pioneiro que se tentou efectuar constituiu um enorme desafio, considerando as limitações de tempo, a que se juntaram as limitações pessoais; por outro lado, o elevado risco de não atingir resultados suficientemente relevantes remete para a necessidade de continuar na senda de aperfeiçoamento contínuo.

Na análise da susceptibilidade foram aplicadas as regras definidas no *Guia Metodológico Para a Produção de Cartografia Municipal de Risco e Para a Criação de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) de Base Municipal* (Julião et al., 2009), em termos de variáveis, unidades cartográficas de representação, método de análise, método de validação e critérios de classificação de resultados.

Na modelação da susceptibilidade à rotura foi utilizado um método estatístico bi-variado: o Método do Valor Informativo (Yin e Yan, 1988). Na modelação da propagação dos desabamentos, foi utilizado um programa específico de modelação tridimensional (3D), o método *CONEFALL 1.0* (Jaboyedoff, 2003), considerando todos os pressupostos e princípios de funcionamento do mesmo.

A presente dissertação apresenta-se organizada em 5 capítulos:

O capítulo 1 enquadra a instabilidade de vertentes na literatura científica, resultando da síntese bibliográfica das diversas publicações consultadas no decorrer do processo de elaboração da dissertação. Neste são abordadas as questões de terminologia e os factores que influem nos desabamentos, bem como algumas das metodologias, das ferramentas e das técnicas utilizadas na modelação de desabamentos.

No capítulo 2 é feito, de forma sucinta, o enquadramento geral da cadeia da Arrábida e é dedicado particular interesse à sua orogénese, às estruturas tectónicas que a caracterizam e aos elementos do relevo que a constituem. Este capítulo enquadra ainda a área de estudo nos concelhos da Península de Setúbal.

No capítulo 3 são apresentados os procedimentos e os resultados da criação e validação do inventário de movimentos de vertente. Para além disso, são apresentadas as bases cartográficas utilizadas e o modelo conceptual que guiou todo o trabalho de preparação das variáveis até à integração em projecto SIG.

Os capítulos 4 e 5 constituem as duas peças mais importantes da dissertação, sendo dedicados à modelação da susceptibilidade à ocorrência (capítulo 4) e à propagação (capítulo 5) de desabamentos. Nestes dois capítulos são apresentadas as metodologias utilizadas na modelação e validação dos desabamentos e são analisados e discutidos os resultados da cartografia de susceptibilidade.

CAPÍTULO 1 – A INSTABILIDADE DE VERTENTES NA LITERATURA CIENTÍFICA

1 – Os desabamentos no contexto dos movimentos de vertente

Na concepção de Cruden (1991), um movimento de vertente é um movimento de descida, numa vertente, de uma massa de rocha, terra ou detritos. Neste contexto, a *Working Party on World Landslide Inventory* (WP/WLI, 1993) propõe cinco tipologias de movimento de vertente: Deslizamentos ou escorregamentos (*Slides*); Desabamentos ou quedas (*Falls*); Escoadas ou Fluxos (*Flows*), Expansões laterais (*Lateral spreads*); e Tombamentos ou balançamentos (*Topples*).

Highland e Bobrowsky (2008) definem o desabamento como “uma queda abrupta de uma massa de solo, de rocha, ou de ambos, que provoca um movimento de descida ao longo de uma vertente declivosa”. A queda tem início com o desprendimento da massa, em tracção, e o movimento acontece frequentemente por falta de sustentação na base (por erosão ou remoção artificial), por vibrações (sísmicas ou induzidas), ou ainda por aumento da carga no topo da vertente, situação que pode ser atribuída a causas naturais (*e.g.* infiltração da água; crescimento da vegetação), ou a causas antrópicas (*e.g.* construção de aterros; implantação de estruturas pesadas nas vertentes).

Nesta dissertação, o conceito de desabamento é entendido como mecanismo de queda livre, mas engloba também o processo consequente de movimentação de materiais ao longo da vertente, tipicamente por rolamento ou saltação (Cruden e Varves, 1996).

De acordo com Agliardi e Crosta (2003), os desabamentos caracterizam-se pela elevada energia e mobilidade, factores responsáveis pela maioria das fatalidades que decorrem deste tipo de movimento de vertente.

O desabamento, enquanto processo geomorfológico, pode mobilizar desde pequenos blocos com alguns dm^3 de volume, até grandes blocos com centenas de m^3 de volume. De acordo com Spadari *et al.* (2012), o volume típico dos desabamentos variar entre 10^{-2} a 10^2 m^3 , enquanto as velocidades típicas variam de alguns metros a dezenas de metros por segundo. Nestas circunstâncias, para Guzzetti *et al.* (2002), os

desabamentos são dos mais destrutivos movimentos de massa, independentemente da sua dimensão. Agliardi e Crosta (2003) consideram que a dinâmica dos desabamentos é uma função da localização das áreas de rotura e das propriedades geométricas e mecânicas dos da vertente e dos blocos. Já para Jaboyedoff *et al.* (1999), o declive da superfície topográfica e as propriedades mecânicas dos blocos condicionam o início dos desabamentos, sendo as trajectórias determinadas a partir de quatro principais processos, associados a estádios de movimento:

1- Deslizamento e/ou balançamento, considerado o estado inicial e caracterizado pela baixa velocidade e elevada perda de energia devido à fricção, assumindo neste caso que, em blocos maiores, pode ainda haver deslizamento após o impacto, o que se traduz em maior perda de energia.

2- Queda livre, definida como movimento gravítico em tracção, em que os blocos descrevem trajectórias balísticas com velocidade elevadas a muito elevadas, sendo que durante a queda a energia potencial é transformada em energia cinética. A perda de energia por fricção do ar é desprezível em blocos com volume inferior a 1m^3 e com velocidade inferiores a 30m/s , mas deve ser considerada em blocos de volume superior a 1m^3 e velocidades superiores a 200m/s .

3- Saltação, por impactos que provocam ressaltos dos materiais rochosos e do agregados de solo de maiores dimensões e densidades, sendo neste estado de movimento importantíssimo determinar os valores de coeficiente de restituição de energia.

4- Rolamento, que ocorre em blocos de geometria mais ou menos regular, nomeadamente esféricos ou cilíndricos, e em vertentes rectilíneas ou convexas, com gradientes médios ou baixos e de baixa rugosidade.

Guzzetti *et al.* (2002) consideram que, o rolamento de grandes blocos é raramente observado, sendo mais comuns os movimentos de saltação, que formam sequências rápidas de parábolas. Para Jaboyedoff *et al.* (1999), o processo de saltação é o mais complexo, menos previsível e menos percebido, dos quatro estádios de movimento. Com efeito, durante a saltação verifica-se uma perda de energia, o que pode provocar uma mudança na trajectória. A perda de energia é condicionada pelas propriedades mecânicas dos solos e dos blocos (que podem variar de elástico a rígido), pelo ângulo de impacto dos blocos na vertente, e pela massa e a velocidade do bloco.

De acordo com Dorren (2003), durante a queda existem dois tipos de movimento: (i) movimento de translação do centro da rocha e (ii) movimento de rotação de um bloco em torno do seu centro. A situação anterior é importante se considerarmos que os blocos podem não apresentar uma forma esférica vindo a adquirir, após a rotação no ar e a queda subsequente, uma trajectória diferente.

Segundo Jaboyedoff *et al.* (1999) a instabilidade de vertentes representa um dos inúmeros perigos naturais a que os países com áreas montanhosas e com elevadas densidades populacionais estão sujeitos. Dorren (2003) considera que “os desabamentos nas áreas de montanha ocorrem numa base diária” e para Abdallam (2010), os desabamentos representam um dos processos mais intensos em áreas montanhosas. No mesmo sentido, Crosta e Agliardi (2003) consideram os desabamentos como o tipo mais comum de movimentos de vertentes em áreas de montanha.

De acordo com Loye *et al.* (2009), o risco incrementa com o aumento da população e das suas actividades, sendo muito relevantes as quedas de blocos na rede viária, bastante comum em áreas de montanha (Panthia *et al.*, 2008; Pantelidis e Kokkalis, 2011). Spadari *et al.* (2012) consideram que os desabamentos representam “um perigo severo para a segurança”, não apenas nas áreas montanhosas, mas também em redes viárias costeiras e em obras que impliquem cortes nas vertentes, nomeadamente para a construção ou com vista a exploração de pedreiras.

Paranonuzzi (2008) afirma que a investigação de desabamentos em vertentes naturais tem sido desenvolvida por vários autores nos últimos 30 anos, todos eles recorrendo, essencialmente, às análises assistidas por computador. Contudo, Jaboyedoff e Labiouse (2011) consideram que a determinação exacta das áreas potencialmente ameaçadas por desabamentos é ainda um grande desafio. De acordo com Agliardi e Crosta (2003), a modelação de desabamentos pode apresentar diferentes objectivos e pode ser utilizada para diferentes fins, nomeadamente, na análise regional ou local, na avaliação da susceptibilidade, da perigosidade, do risco e na delineação de estruturas de defesa. Abbruzzese *et al.* (2009) consideram os desabamentos como “uma ameaça em muitos países da Europa e do resto do mundo” e entendem que as metodologias têm vindo a ser desenvolvidas com vista a planear apropriadamente o uso do solo e reduzir o grau de exposição a este tipo de processo

natural, com o objectivo de reduzir os danos potenciais em termos sociais e económicos. De acordo com Ayalew *et al.* (2005), a investigação na área da instabilidade de vertentes e a cartografia da susceptibilidade é uma componente fundamental na gestão da perigosidade e representa uma importante base para a definição de medidas para diminuir o risco de viver com este tipo de fenómeno.

Copons e Vilaplana (2008) consideram que a ocupação de áreas deprimidas na envolvente de áreas montanhosas por áreas urbanas, infra-estruturas, áreas agrícolas, áreas de recreio, ou pela rede viária, aumentam a ameaça deste tipo de fenómenos, pelo que o planeamento territorial destas áreas deva focar a sua atenção, em primeiro lugar, na identificação das áreas susceptíveis e, em segundo lugar, na identificação dos elementos expostos.

2 – Os factores dos desabamentos

Na perspectiva da Mecânica de Solos e das Rochas, o constante jogo de forças opostas que se verifica nas vertentes, (resistência ao corte/tensão tangencial), determina o grau de estabilidade das mesmas, quantificado pelo respectivo Factor de Segurança. A resistência ao corte corresponde à resistência mecânica e tende a promover a estabilidade na vertente. Por outro lado, a tensão tangencial corresponde à força que promove a instabilidade na vertente (Popescu, 1996).

Na perspectiva geomorfológica as causas dos movimentos de vertente incluem factores de predisposição, preparatórios e desencadeantes (Glade e Crozier, 2005). Os factores de predisposição, intrínsecos e sempre presentes na vertente, determinam o grau de susceptibilidade à ocorrência de movimentos de vertente e incluem: factores geológicos (estrutura geológica, litologia e solos); factores geomorfológicos (curvatura de vertentes, morfoestrutura); factores geométricos (declive, comprimento e comando da vertente); factores hidrológicos (canalização de fluxos, processos de escorrência e processos de infiltração e escoamento sub-superficial); e factores relacionados com o uso e a cobertura do solo (práticas agrícolas, impermeabilização da superfície e a presença e densidade de vegetação).

Os factores preparatórios e os factores desencadeantes são dinâmicos e, frequentemente, envolvem os mesmos processos. Os factores preparatórios são

responsáveis pela redução do factor de segurança, por acumulação de tensões e/ou redução da resistência ao corte, mas sem iniciar o movimento. Os factores desencadeantes representam a causa imediata da instabilidade e determinam o ritmo temporal dos movimentos de vertente (Zêzere, 2005). Os factores desencadeantes podem ser de dois tipos, naturais ou antrópicos. Os factores naturais são os sismos, a precipitação, os processos ligados a ambientes frios associados a neve e gelo, o vulcanismo e a própria actividade biológica nos solos, (animais e vegetais), com implicação no comportamento e na mecânica dos solos. Os factores antrópicos incluem regularizações nas vertentes com vista a utilização agrícola; abertura de taludes para construção de estradas ou edifícios; e a construção de aterros.

De acordo com Dorren (2003), os desabamentos resultam da combinação de factores topográficos, geológicos e climatológicos, aos quais se junta o factor tempo. Para este autor, a morfologia da vertente e da envolvente próxima das potenciais áreas de rotura são determinantes no desenvolvimento deste tipo de movimentos de vertente. Ainda de acordo com Dorren (2003), a actividade antrópica é um factor de menor importância quando comparado com os factores geológicos, embora localmente possa ter um papel muito significativo.

Os tipos de movimentos ou os estádios de movimento dos desabamentos, tal como descritos em Jaboyedoff *et al.* (1999), dependem do declive da vertente. Segundo Dorren (2003), o processo de rolamento de blocos pode ser verificado em declives médios iguais ou inferiores a 45°, a saltação de blocos por impactos sucessivos observa-se em declives que variam entre os 45° e os 70°, enquanto os processos de queda livre ocorrem em declives médios superiores a 70°.

Quanto aos factores que influenciam a trajectória, Dorren (2003) considera que a fricção do ar influencia a velocidade da queda, mas não tem influência no movimento. Adicionalmente, a colisão com outros blocos (ou outros elementos presentes na topografia) durante a queda é muito difícil de analisar e de determinar, sendo certo que é susceptível de originar ressaltos. Durante o primeiro ressalto a rocha pode fragmentar-se ou não, dependendo dos tipos de materiais envolvidos (bloco e vertente), mas, independentemente do caso, entre 75% a 86% da energia ganha na queda livre é perdida durante o primeiro impacto (Dorren, 2003).

3 – A modelação de desabamentos

A modelação de desabamentos é suportada conceptualmente pela leitura prospectiva do princípio do Uniformitarismo, preconizada por Varnes (1984) na afirmação de que “o passado e o presente são as chaves do futuro”. Com efeito, no caso das roturas e propagações, assume-se que as mesmas causas que produziram ocorrências passadas são susceptíveis de gerar novas ocorrências.

A análise da susceptibilidade à ocorrência de desabamentos corresponde à primeira abordagem em termos preventivos, não devendo esta ser considerada suficiente, especialmente quando existam populações, bens, actividade e ou infra-estruturas, passíveis de ser afectadas. Desta forma, devem ser identificadas (i) as áreas susceptíveis à rotura e consequente mobilização de blocos; (ii) as áreas susceptíveis a ser atingidas pelos blocos durante as suas trajectórias, incluindo a dispersão lateral; (iii) as distâncias máximas que os blocos podem atingir até que se depositem (Jaboyedoff e Labiouse, 2003).

A avaliação da susceptibilidade à ocorrência de desabamentos, nomeadamente no que respeita à identificação das potenciais zonas de rotura é frequentemente efectuada com recurso a métodos estatísticos de correlação espacial entre ocorrências passadas e um conjunto de factores de predisposição (Baillifard *et al.*, 2003; Fell *et al.*, 2008). No entanto, existem limitações que decorrem da fase de recolha de dados, no campo e no gabinete, que podem resultar numa avaliação menos bem conseguida da susceptibilidade. De acordo com Agliardi e Crosta (2003), as limitações podem agregar-se em três conjuntos interligados e funcionando em cascata: (i) limitações operacionais; (ii) limitações orçamentais; e (iii) limitações técnicas. No primeiro caso encontram-se as limitações de acesso a determinadas áreas, com vista a obtenção de dados de campo que, eventualmente, poderiam ajudar a refinar a calibração de alguns parâmetros básicos. As limitações orçamentais podem influir significativamente nos resultados finais, principalmente quando obrigam à assunção de valores padrão para algumas grandezas que poderiam ser determinadas experimentalmente no campo ou no laboratório, na presença de meios financeiros adequados. Por último, as limitações técnicas podem ser reflexo das anteriores. A performance técnica dos modelos está muito condicionada pela existência de bons dados topográficos, razão pela qual todos

os manuais recomendam a utilização de dados de elevada resolução, nomeadamente o Modelo Numérico de Elevação (Jaboyedoff *et al.*, 1999; Abellán *et al.*, 2006; Loye *et al.*, 2009; Jaboyedoff e Labiouse, 2011). No caso de não existirem na resolução adequada, podem ser ou adquiridos a terceiros ou obtidos com recurso à tecnologia disponível, como fizeram Abellán *et al.* (2006), que utilizaram o TLS (Terrestrial Laser Scanner), e Lan *et al.* (2010), que utilizaram o LiDAR (Light Detection and Ranging), com vista à aquisição de informação topográfica de pormenor. Contudo, existe um custo associado que frequentemente aumenta no mesmo sentido do aumento da resolução pretendida. Ainda neste âmbito podem ser englobadas as próprias limitações técnicas dos programas que, ainda assim e segundo Guzzetti *et al.* (2002), funcionam relativamente bem em áreas pequenas e onde exista informação detalhada disponível.

De acordo com Paranonuzzi (2008), a modelação de desabamentos assenta, essencialmente, em abordagens cinemáticas que simulam a queda de um os mais blocos, com recurso a algoritmos geomecânicos que descrevem o movimento de saltação, baseados na utilização de valores de coeficiente de restituição de energia no seguimento dos sucessivos impactos. Segundo o mesmo autor, o principal problema na modelação reside na definição dos valores do referido coeficiente, que apresentam uma grande amplitude de valor para valor e produzem resultados por vezes contraditórios, uma vez que estes são fortemente influenciados pelas condições de impacto.

Os desabamentos tendem a produzir processo de evolução regressiva nas vertentes naturais. Isto é, um bloco desabado do topo da vertente tenderá a seguir uma trajectória definida pela geometria da vertente e pelas propriedades mecânicas do bloco. Desta forma, o topo da vertente passa a ocupar uma posição mais a montante do que a inicial, significando que as características geométricas da vertente foram alteradas, pelo que o comportamento futuro pode ser completamente diferente do actual. Os desabamentos ocorridos em qualquer outro ponto da vertente, mesmo junto da sua base, não determinam uma evolução regressiva imediata, mas ela tende a verificar-se a médio-longo prazo, em virtude da busca constante do denominado equilíbrio dinâmico por parte da vertente, enquanto exemplo de sistema natural. Neste contexto, novos blocos desabados poderão atingir pontos da topografia ainda

mais afastados do que os observados anteriormente. A possibilidade de ocorrência de “eventos inesperados”, referida por Agliardi e Crosta (2003), levou estes autores a recomendar uma abordagem conservadora na definição de limiares de declive a utilizar para o cálculo das distâncias de propagação, abordagem esta que parece ser a mais razoável, principalmente se pensarmos que os modelos de propagações simulam a queda e a trajectória de um bloco independente e estimam a distância máxima que este pode atingir, não considerando a mobilização conjunta de blocos (Avalanches/Escoadas), com comportamento, velocidade e energia totalmente diferentes.

Loye *et al.* (2009) definem “fontes” como as áreas de desprendimento de blocos, cujas evidências são encontradas nas vertentes declivosas, podendo ser identificadas através do inventário de campo ou dos inventários históricos. A inventariação das fontes de instabilidade é determinante para identificar futuras (potenciais) fontes de instabilidade, através da aplicação de métodos de base estatística.

Na simulação da propagação dos desabamentos e nos cálculos das trajectórias, os blocos mais afastados (Extreme Blocks) são utilizados como referência na simulação e estimação de eventos futuros, nomeadamente para estabelecer as distâncias máximas que os blocos desabados podem atingir (Abruzzese *et al.*, 2009). Neste contexto, é de toda a conveniência que os modelos sejam calibrados, assim como é aconselhável a utilização de modelos probabilísticos (Agliardi e Crosta, 2003), uma vez que todos os modelos incorporam um determinado grau de incerteza.

3.1 – Principais condicionantes do processo de modelação de desabamentos

Guzzetti *et al.* (2002) sugerem que o processo de modelação de desabamentos pode parecer simples e que, após a determinação do ponto de rotura (fonte), a geometria da vertente, a energia perdida em cada impacto e a localização actual do bloco deveriam permitir determinar a localização e a velocidade do bloco para qualquer ponto da sua trajectória. Contudo, e como verificado também por Agliardi e Crosta (2003), o “comportamento de um bloco” durante a sua trajectória não é previsível “nem no tempo nem no espaço”, mesmo sendo conhecidas as condições iniciais e as forças motrizes envolvidas (Guzzetti *et al.*, 2002; Agliardi e Crosta, 2003).

A trajectória de um bloco ao longo de uma vertente é comanda por factores que funcionam em interligação, o que aumenta a complexidade do seu estudo e da sua determinação exacta. Factores como a localização do ponto de rotura, a dimensão, o volume, a geometria do bloco, as propriedades mecânicas do bloco e dos materiais que constituem a vertente, e a topografia local, incrementam o grau de complexidade. Dos factores anteriores, os mais difíceis de determinar com exactidão são, segundo Guzzetti *et al.* (2002), o ponto exacto de rotura e as propriedades mecânicas do bloco e dos materiais da vertente. Por seu turno, a geometria da topografia, que depende do gradiente de terreno (declive), da rugosidade e das concavidades e das convexidades, pode variar substancialmente ao longo de uma vertente. Por último, a energia perdida pelos sucessivos impactos ou por fricção, seja em deslizamento ou rolamento, estão dependentes da dimensão, do volume, da geometria e do tipo de material do bloco, da geometria da topografia, da velocidade e do ângulo de impacto do bloco na topografia (Guzzetti *et al.*, 2002). Para além dos anteriores, Crosta e Agliardi (2003) consideram ainda a presença e a densidade da vegetação na vertente como factores susceptíveis de acrescentar incerteza na modelação de desabamentos.

Pelo que ficou exposto, não se apresenta como tarefa fácil a modelação de desabamentos, devido à imbricação de factores que funcionam em interdependência. Actualmente, o grande desafio que se coloca é o do desenvolvimento de metodologias cada vez mais eficazes com vista à simplificação dos processos e à optimização dos resultados (Guzzetti *et al.*, 2002; Jaboyedoff e Labiouse, 2011), tanto na modelação das áreas susceptíveis à ocorrência de desabamentos como nos cálculos das trajectórias e na delimitação das áreas de propagação.

3.2 – Métodos utilizados na modelação de desabamentos

Abbruzzese *et al.* (2009) consideram que os métodos de avaliação da susceptibilidade à ocorrência e à propagação de desabamentos podem ser divididos em três tipos: métodos empíricos, métodos geológicos/geomorfológicos e métodos analíticos.

Os métodos empíricos assentam no registo da distribuição dos blocos na vertente e pretendem estimar as distâncias máximas percorridas pelos blocos desde o ponto de

rotura até ao local onde se depositam. Através da análise dessa distribuição é possível determinar ângulos de declive, a partir dos quais os desabamentos podem ocorrer e propagar, designados por “ângulo da linha de energia” (*line of energy angle*) por Jaboyedoff e Labiouse (2011), sendo propostas duas abordagens: (i) *Fahrböschung* (ii) Mínimo Ângulo de Sombra (*minimum shadow angle*).

O *Fahrböschung* foi proposto por Heim em 1932 (*ob.cit. in Dorren, 2003*) e corresponde ao ângulo entre o plano horizontal e a linha recta traçada do topo da vertente ao ponto de paragem do bloco mais afastado. Este método foi inicialmente desenvolvido com base na ocorrência de avalanches rochosas e, basicamente, considera toda a vertente como potencial área de mobilização de blocos e delimita a distância máxima que estes podem atingir até que se depositem, através de um ângulo limite variável, tendo em conta as especificidades locais. O Mínimo Ângulo de Sombra (*minimum shadow angle*) foi proposto por Evans e Hungr em 1993 (*ob. cit. in Dorren, 2003*) e corresponde ao ângulo entre o plano horizontal e a linha recta traçada da fonte do desabamento ao ponto de paragem do bloco mais afastado. O princípio de delimitação da distância máxima que os blocos podem atingir é basicamente o mesmo e a diferença das abordagens reside no facto de considerar toda a vertente como fonte potencial, ou considerar apenas os pontos de rotura (Dorren, 2003). Corominas (1993) define o método de *Fahrböschung* como “*angle of reach*”, ou ângulo de alcance.

Na presente dissertação utiliza-se o Mínimo Ângulo de Sombra (*minimum shadow angle*), que na realidade também determina um ângulo de alcance, sendo esta designação adoptada na presente dissertação, apenas por comodidade gramatical.

Os métodos geológicos/geomorfológicos baseiam-se na análise da instabilidade passada e na inspecção detalhada das características da topografia e da presença de factores de instabilidade (Abbruzzese *et al.*, 2009). Desta forma, Jaboyedoff *et al.* (1999) propõem uma metodologia com aplicação na escala regional e local, designada por *MATTEROCK*, que assenta na identificação das áreas susceptíveis à ocorrência de desabamentos com base na análise das discontinuidades, entendidas como a interrupção da continuidade física de uma formação rochosa. Na análise das discontinuidades são delimitadas áreas homogêneas do ponto de vista estrutural, com orientações ou com propriedades geológicas similares.

Os métodos analíticos podem ser ainda designados por cinemáticos uma vez que contemplam o movimento (Abbruzzese *et al.*, 2009) e focalizam o enfoque na propagação dos desabamentos. Os métodos analíticos têm vindo a ser desenvolvidos desde meados da década de 70 do século XX, sendo que o ano de 1976 corresponde à primeira referência apontada por Guzzetti *et al.* (2002) ao programa bidimensional “*Computer Rockfall Model*”, desenvolvido por Piteaux e Clayton. No âmbito dos métodos analíticos, Dorren (2003) considera a existência de modelos de base física (*process-based models*); e modelos de base SIG (*GIS-based models*).

Quando nos referimos à modelação falamos em simulação, logo podemos simular um desabamento sem que este aconteça efectivamente, situação que pode servir os objectivos do estudo. O problema que se coloca é a dificuldade em relacionar as simulações, nomeadamente o número de blocos projectados, seja este definido pelo utilizador ou limitado pelo programa utilizado, o que remete para o grau de subjectividade que deriva do tipo de abordagem que a metodologia utiliza e da capacidade técnica de quem desenvolve o estudo. Esta situação é particularmente notória em abordagens heurísticas, que assentam no denominado “*expert knowledge*”, como afirmam Baillifard *et al.* (2003).

3.3 – Programas de modelação de desabamentos

Para Guzzetti *et al.* (2002), os vários tipos de programas disponíveis (e.g. STONE, CONEFALL) simulam a queda e realizam o cálculo das trajectórias dos blocos, tendo sido desenvolvidos com o intuito de simplificar os processos e otimizar os resultados. De acordo com os referidos autores, as aplicações informáticas assentam em três diferentes abordagens: (i) *Lumped Mass*; (ii) *Rigid Bodie*; (iii) *Hibryd*.

1 – Na abordagem do tipo *Lumped Mass*, considera-se a massa concentrada num ponto, o centro da massa. Esta abordagem apresenta vantagens significativas na computação dos dados, uma vez que o bloco é desprovido de forma e de dimensão, assumindo-se que este define a sua trajectória tendo em conta o sentido do maior declive na vertente, até que se deposite (Jaboyedoff e Labiouse, 2011). No entanto, Jaboyedoff e Labiouse (2011) realçam que a forma do bloco influencia a trajectória e consideram-na na modelação, ainda que através de parâmetros aleatórios. De acordo

com os referidos autores, a consideração da forma é bastante útil para estimar as distâncias máximas percorridas (*run-out*), embora dificulte a determinação das áreas afectadas pela trajectória do bloco.

2 – Na abordagem *Rigid Bodie*, ou corpo rígido, é assumida uma geometria simples do bloco (e.g. esfera, cilindro, disco) o que se pode considerar como uma aproximação à realidade.

3 – Na abordagem *Hibryd*, ou híbrida, são condensadas as duas abordagens anteriores, mas em fases diferentes da modelação: *Lumped Mass* na fase de simulação do desabamento; e *Rigid Bodie* na fase de simulação das trajectórias, por impacto, rolamento ou saltação.

Deste modo, verifica-se que as diferentes abordagens não contemplam a massa efectiva nem a geometria real dos blocos, razão pela qual os resultados finais devem ser analisados com cautela. Com efeito, é sabido que as trajectórias são condicionadas por factores relacionados com a geometria das vertentes e com as propriedades mecânicas dos terrenos que as constituem, assim como com a presença e densidade de vegetação, independentemente do porte. Por seu turno, a geometria e o volume dos blocos são factores determinantes na velocidade e na magnitude dos desabamentos.

CAPÍTULO 2 – ENQUADRAMENTO DA ÁREA DE ESTUDO

1 – A Cadeia da Arrábida

A área de estudo localiza-se na cadeia da Arrábida, que apresenta uma estrutura complexa com orientação ENE-WSW e é constituída por formações geológicas de diferentes resistências, que originaram uma “topografia muito movimentada” (Alcoforado *et al.*, 1993, p. 215). De acordo com Kullberg *et al.* (2006), as estruturas e morfologia da Arrábida tornam-na no mais elegante exemplo de tectónica orogénica alpina em Portugal. A cadeia da Arrábida, de orientação paralela à da cordilheira Bética, resultou da tectónica compressiva que inverteu as estrutura distensivas da Bacia Mesozóica Lusitaniana, durante a orogenia Alpina, no decurso do Miocénico (Crispim, 1999). Pais e Legoinha (2000) referem a ocorrência de duas fases tectónicas fundamentais: uma há cerca de 17 Ma e outra mais recente do que 16 Ma.

1.1 – Posição Geográfica

A cordilheira da Arrábida situa-se na parte meridional da península de Setúbal (Figura 2.1), sendo limitada a Sul e Oeste pelo Oceano, e confinando a Norte e Oriente com as terras baixas e arenosas que ocupam a maior parte dessa península (Ribeiro, 2004). Está incluída na Área Metropolitana de Lisboa, estando compreendida entre os paralelos 38° 24' 25'' N e 38° 35' 30'' N e entre os meridianos 8° 53' 16'' W e 9° 13' 15'' W. A cadeia da Arrábida é um pequeno conjunto de montanhas, que culmina no vértice do Formosinho (501m), com um comprimento de 35 quilómetros (entre o Cabo Espichel e Camaral, a NNE de Palmela) e uma largura média de 6 quilómetros.

De acordo com Pedro (1998), a serra da Arrábida pode ser entendida, no sentido lato, como “um conjunto de montes que acompanham o rebordo costeiro meridional da península de Setúbal” (*ob. cit.*, p. 15); e no sentido restrito, como as mais importantes elevações que constituem o núcleo orográfico da cadeia, sensivelmente entre Sesimbra e Setúbal, incluindo as Serras de Formosinho e de São Luís e o alinhamento de relevos monoclinais que constituem as Serras de S. Francisco e do Louro.

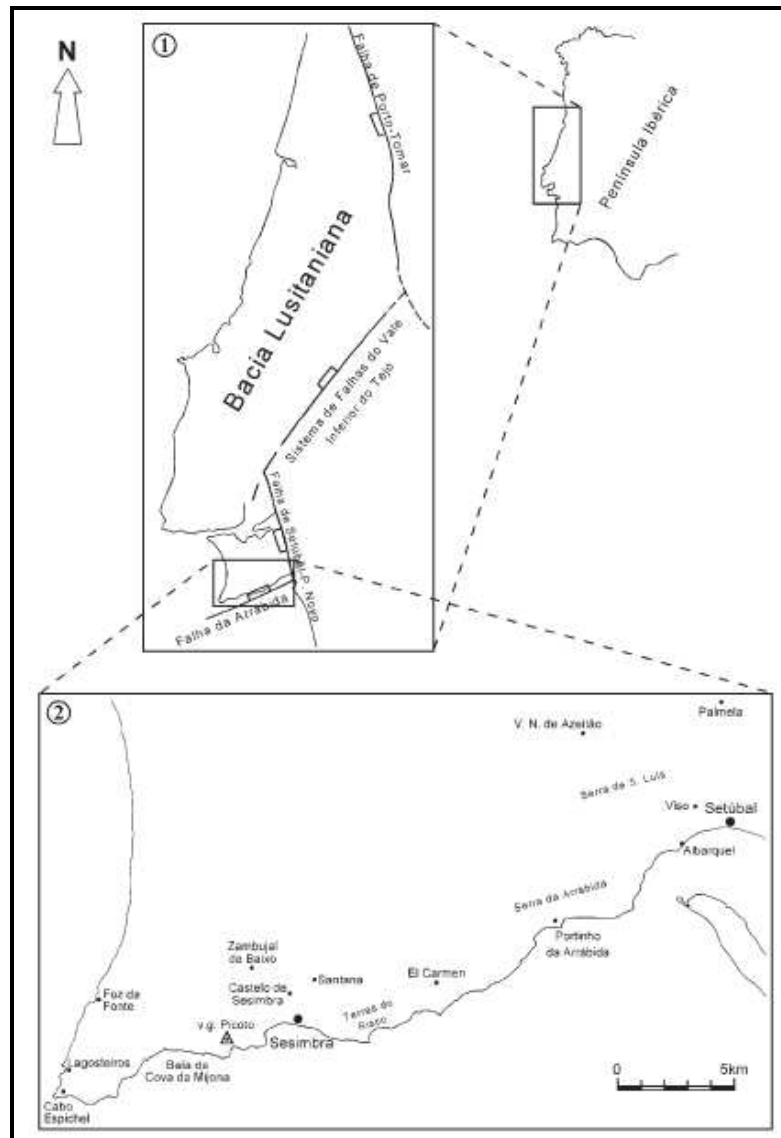


Figura 2.1 – Localização da Arrábida no contexto da Bacia Lusitaniana (Extraído de Kullberg *et al.*, 2000).

1.2 – Estruturas tectónicas e litologia

A Arrábida apresenta uma estrutura enrugada e complexa, de onde se destaca um conjunto de dobras de direcção ENE-WSW, cortadas por desligamentos esquerdos de direcção NNW-SSE a NNE-SSW, formadas por empilhamentos de cavalgamentos vergentes para sul (Kullberg *et al.*, 2000). De acordo com Ribeiro (1968), a Arrábida é constituída por três linhas de anticlinais dispostas em corrediça. Dos anticlinais da primeira linha resta apenas uma parte do flanco norte, “que se despenha no mar por grandes escarpas de falha, poderosamente retocadas pela abrasão” (*ob. cit.*, p. 115). Destacam-se as dobras anticlinais de Formosinho e de S. Luís, com expressão directa

no relevo, de orientação ENE-WSW, limitadas a sul por escarpas de falha vigorosas, associadas a planos de cavalgamento inclinados para norte.

Para Ribeiro (1968), a compreensão da evolução geológica e da natureza dos materiais dos relevos, são a chave para entender as formas estruturais presentes na Arrábida. Este autor descreve, de forma esquemática, a formação da Arrábida em seis fases fundamentais: (i) a deposição de espessas camadas de margas infraliásicas, gipsíferas, que constituem o substrato plástico das formações calcárias dominantes de idade jurássica e que explicam o vigor de certos acidentes tectónicos; (ii) sucede-se um fraco aprofundamento do mar, onde se sedimentaram, durante o resto do Lias e todo o Dogger, camadas de calcários dolomíticos e siliciosos na base, e mais ou menos margosos no topo; (iii) no Neojurássico começa o enrugamento da Arrábida e a emersão dos primeiros anticlinais; no sopé dos relevos entretanto formados depositam-se grandes taludes de escombreyas enriquecidas com acarreios de blocos siliciosos, oriundos do maciço antigo, dando origem a camadas alternantes de calcários, arenitos e brechas, assentes em clara discordância angular; (iv) o regime de emersão terá continuado durante o Cretácico e o Paleogénico, com retornos episódicos do mar; (v) no decurso do Miocénico ocorreu uma importante transgressão que foi responsável pela formação de novas rochas calcárias; e (vi) a ocorrência do surto tectónico principal responsável pela cadeia da Arrábida, verificada no fim do Miocénico.

Os materiais que constituem as estruturas da cadeia da Arrábida, à excepção das rochas eruptivas dos filões que afloram no sector ocidental, são de origem sedimentar marinha, marinho-salobre ou lacustre, tendo as camadas mais antigas sofrido mais ou menos intensa dolomitização (Pedro, 1998). As rochas do Infraliássico são compostas por margas intercaladas por calcários dolomíticos e gesso, margas mais ou menos dolomíticas, também com gesso, calcários mais ou menos compactos ou margosos com intercalações de dolomia, calcários siliciosos, calcários margosos, calcários fino, calcários rijos e margas dolomíticas (Pedro, 1998).

Com idade do Jurássico Médio (Dogger) ocorrem margas com intercalações de calcários dolomíticos, calcários siliciosos, calcários dolomíticos e margas, calcários um tanto margosos, compactos mais ou menos compactos e calcários finos. O Jurássico

superior (Malm) é representado por calcários mais ou menos margosos e margas, conglomerados, argilas e calcários detríticos. Os afloramentos cretácicos são marcados pela presença de calcários, margas e grés. As rochas de idade paleogénica correspondem a conglomerados calcários, arenitos grosseiros e calcários lacustres. Durante o Miocénico, a península de Setúbal foi invadida pelo mar, o que determinou a formação de calcários e calcários margosos e gresosos. Os sedimentos detríticos arenosos do Pliocénico cobrem parte do Miocénico, O Cretácico, e o Jurássico superior. Por último, ocorre um complexo de areias finas pouco argilosas, que são atribuídas ao final do Plistocénico ou início do Quaternário.

1.3 – Orografia

A cadeia da Arrábida pode dividir-se em dois sectores bem distintos do ponto de vista morfológico: Centro-Oriental e Ocidental, separados sensivelmente pela depressão diapírica de Sesimbra (Figura 2.2).

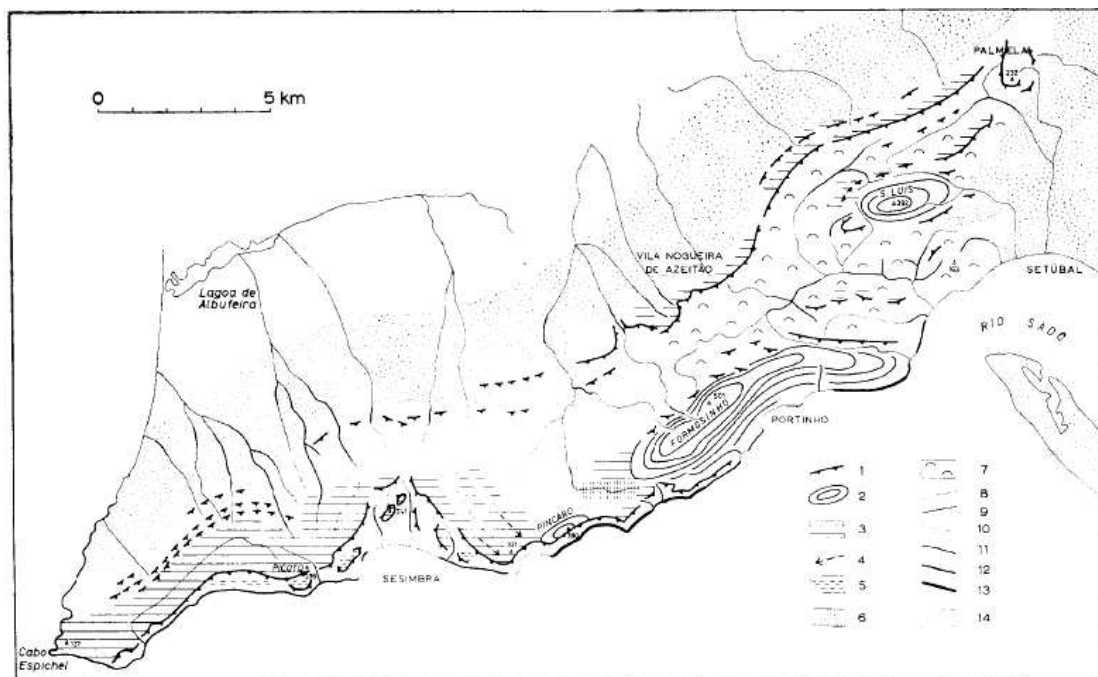


Figura 2.2 – Esboço morfológico da Arrábida, por S. Daveau e O. Ribeiro (Extraído de Ribeiro, 1968).

1 – rebordo monoclinal em rocha dura; 2 – monte anticlinal; 3 – aplanção principal a cerca de 200 m; 4 – arrebite da aplanção a leste de Sesimbra; 5 – rechãs litorais embutidas na aplanção principal; 6 – depressão cársica; 7 – relevo de colinas arredondadas; 8 – vale de formas largas; 9 – vale encaixado; 10 – costa arenosa; 11 – arriba com menos de 100 m; 12 – arriba com 100 a 200 m; 13 – arriba com mais de 200 m; 14 – área baixa periférica.

O sector Centro - Oriental é marcado pelo domínio de formas de relevo estruturais, de onde se destacam os montes anticlinais do Formosinho e de S. Luís. As formações predominantemente detríticas do Jurássico superior foram exploradas pela erosão diferencial, que determinou o desenvolvimento de depressões ortoclinais onde hoje se encontram instaladas as ribeiras da Corva, de Aljube e da Ajuda. As Serras de S. Francisco e do Louro localizam-se a norte das depressões ortoclinais e correspondem a relevos do tipo Costeira e Crêt, talhados numa estrutura geológica monoclinal, com as camadas inclinadas para norte, sustentados pelos afloramentos de calcários lacustres do Paleogénico e calcários do Miocénico, que afloram em cornija no topo dos anversos dos relevos monoclinais.

O sector ocidental da cadeia da Arrábida é dominado por um conjunto de aplanamentos, de entre os quais se destaca a Plataforma do Cabo, ligeiramente inclinada para SW e com cotas compreendidas entre 201m e 130m.

2 – Localização e abrangência territorial da área de estudo

A área de estudo ocupa uma superfície de 117.5 km² e corresponde, grosso modo, à Serra da Arrábida, entendida em sentido restrito. A área de estudo abrange três concelhos do distrito de Setúbal, a saber, Sesimbra, Setúbal e Palmela. Na figura 2.3 estão representados os concelhos da Península de Setúbal, no contexto geográfico de Portugal Continental, bem como a área de estudo no contexto geográfico da Península de Setúbal.

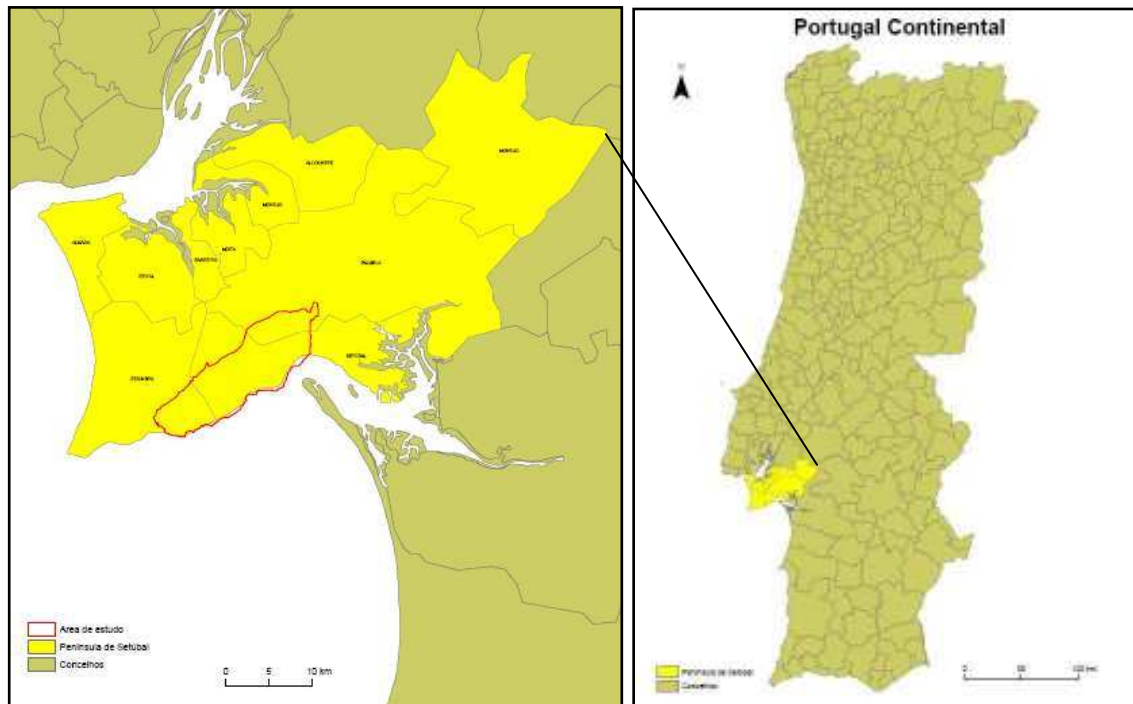


Figura 2.3 – Localização e limites da área de estudo

Como podemos verificar, a área de estudo apresenta uma distribuição bastante desigual pelos três concelhos. Na tabela 2.1, são apresentadas as distribuições absolutas e relativa por concelho na área de estudo, o que permite verificar que o concelho de Setúbal é aquele que apresenta menor área total (161.8 km^2), sendo o concelho de Sesimbra o segundo menor em termos de área total (193.6 km^2). Por sua vez o concelho de Palmela apresenta uma área total de 457.2 km^2 , o que faz com que seja superior à área ocupada pelos outros dois concelhos em 101.8 km^2 . Contudo, a distribuição em termo de área total em nada reflecte a distribuição na área de estudo.

O concelho de Sesimbra ocupa a segunda posição em termos de área absoluta, do concelho, inserida na área de estudo (26.2 km^2) bem como em termos relativos, quer seja pela percentagem de área do concelho na área de estudo (13.5%) ou pela representatividade relativa na área de estudo (22.3%). Por oposição o concelho de Setúbal assume a liderança em todos os campos, é aquele que ocupa mais área de estudo (68.7 km^2) o que corresponde a 42.5% do seu território, fazendo com que a distribuição relativa da área de estudo (58.5%) seja feita maioritariamente por este concelho. O concelho de Palmela o maior em termos de área total, mas apenas apresenta uma pequena parte do seu território inserida na área de estudo (4.9%). No

entanto, em termos de distribuição relativa na área de estudo (19.2%) esta é aproximada da área relativa ocupada pelo concelho de Sesimbra (22.3%).

Tabela 2.1 – Distribuições absolutas e relativas por concelho na área de estudo.

Concelho	Área total (km ²)	Área de estudo (km ²)	Área do concelho na área de estudo (%)	Área de estudo (%)
Sesimbra	193.6	26.2	13.5	22.3
Setúbal	161.8	68.7	42.5	58.5
Palmela	457.2	22.6	4.9	19.2
Total	812.5	117,5	-----	100.0

CAPÍTULO 3 – INVENTÁRIO DE MOVIMENTOS DE VERTENTE E BASES CARTOGRÁFICAS

Os dados necessários ao desenvolvimento dos processos de modelação e validação da cartografia de susceptibilidade à ocorrência de desabamentos devem ser definidos à partida e de acordo com o objectivo geral do estudo. Contudo, para atingir os objectivos específicos pode ser necessário utilizar diferentes dados ou, pelo menos, pode ser necessário utilizar a mesma informação de base, mas em diferentes fases do trabalho. Tomando por exemplo a utilização das áreas de rotura (fontes) na análise da susceptibilidade à ocorrência de desabamentos, as mesmas servem para gerar o modelo e para a sua validação. As áreas de rotura voltam a ser utilizadas nos modelos de avaliação da susceptibilidade à propagação de desabamentos, mas a validação dos resultados é efectuada com os depósitos de blocos e os blocos isolados, inventariados por foto-interpretação e com trabalho de campo.

1 – Delimitação da área de estudo

O processo de delimitação da área de estudo inicia-se com a criação de um projecto em ambiente SIG, no caso com recurso ao programa *ArcGIS 9.3*, e a criação de um tema “Área de estudo” que serviu para balizar a área a inventariar. Contudo, os limites sofreram ligeiras modificações, durante os restantes processos, nomeadamente condicionados pelos ajustes às restantes bases cartográficas utilizadas. A figura 3.1 apresenta os ortofotomapas utilizados, com uma resolução de 0,5m, sobre os quais foram sobrepostos os concelhos da Península de Setúbal abrangidos no estudo, bem como a delimitação da área de estudo.



Figura 3.1 – Concelhos da Península de Setúbal e limites da área de estudo.

Na delimitação da área de estudo, foi seguida a recomendação de Fell *et al.* (2008) em “Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning”, onde os autores referem que, durante o processo de zonamento, devem ser considerados todos os movimentos dentro da área de estudo, bem como todos aqueles verificados na envolvente e que possam, eventualmente, vir a atingir a área de estudo. Os mesmos autores recomendam, por um lado, que seja efectuado um zonamento da susceptibilidade autónomo para cada tipologia de movimentos de vertente, uma vez que estes apresentam relações distintas com os factores de predisposição. Por outro lado, recomendam que o potencial de progressão e retrogressão dos movimentos seja avaliado e tomado em consideração na delimitação da área de estudo.

Face ao exposto, a área de estudo foi delimitada a Norte pela E.N. 379, assumindo-se que os desabamentos com origem na Arrábida não ultrapassarão este limite, face às condições morfológicas das áreas adjacentes a Norte da Arrábida. Tal como é afirmado

no portal do ICNB (www.icn.pt), “a Norte da Cordilheira da Arrábida estende-se uma vasta área de planície que apresenta a sua maior largura junto ao limite Oeste do Parque Natural da Arrábida, estreitando-se progressivamente à medida que se caminha para Este, onde junto a Palmela chega a ser praticamente inexistente”. Desta forma a E.N. 379, poderia funcionar como uma barreira física, sem com isto quer dizer que os desabamentos não possam ultrapassar facilmente este tipo de barreira.

O limite Sul da área de estudo corresponde à linha de costa, não levantando, por isso, qualquer tipo de discussão. O limite Oriental corresponde, sensivelmente, à vertente Sul da colina do Castelo de Palmela, prolongando-se até ao estuário do Sado, junto a Setúbal. O limite Ocidental acompanha a mesma E.N. 379 e contorna a Oriente a Vila de Sesimbra, englobando assim a vertente Ocidental da Serra do Risco.

2 – Inventário de movimentos de vertente

A criação do inventário de movimentos de vertente corresponde ao suporte dos procedimentos de modelação, uma vez que este funciona como variável dependente. No caso da presente dissertação, trata-se de uma variável que foi produzida de raiz, uma vez que não existia nenhum inventário de desabamentos disponível para a área de estudo.

A realização do mapa de susceptibilidade à ocorrência de desabamentos implica a identificação das áreas de rotura ou de partida dos movimentos, aqui designada por “Fonte de desabamento”. Neste contexto, apresentam-se seguidamente, de forma sucinta, as etapas da elaboração do “Inventário de Fontes de Desabamentos”.

Uma vez na presença dos ortofotomapas digitais com pixel de 0,5 m (obtidos em 2004) e dos limites da área de estudo, inicia-se o processo de delimitação das ocorrências por foto-interpretação. Esta é uma fase morosa e a identificação das ocorrências evolui com a persistência. Isto é, apesar da qualidade e da resolução dos ortofotomapas, nem sempre é possível a identificação das ocorrências ou dos elementos presentes na vertente de forma inequívoca. Existem situações onde as evidências são claras, sendo que critérios auxiliares como a presença de declives muito elevados, as mudanças na vegetação, na textura e coloração da paisagem podem facilitar a tarefa.

Para servir de apoio á fase anterior, recorreu-se ao *Google Earth* e foram utilizadas imagens mais recentes que as dos ortofotomapas. Desta forma e, ainda no *ArcGis 9.3*, foi criado um tema com as grelhas que acompanham as curvas de nível, em quadrículas de 1kmx1km. Posteriormente, este tema foi exportado, com a extensão “KML”, o que possibilita a sua utilização no *Google Earth*, tornando-se assim mais fácil acompanhar e detectar incongruências e ou esclarecer dúvidas suscitadas na fase de interpretação dos ortofotomapas. Adicionalmente, a análise das imagens do *Google Earth* permitiu detectar novas ocorrências, que nos ortofotomapas estavam cobertas por vegetação e que, entretanto, devem ter sido sujeitas a incêndios. Apesar de tudo existiam, ainda assim, situações nas quais as dúvidas persistiam.

Após a realização da etapa anterior foi efectuada uma pré-validação dos elementos delimitados, nomeadamente os limites dos movimentos inventariados e o esclarecimento de algumas situações menos evidentes, tendo-se recorrido a um geomorfólogo mais experiente. A tarefa de pré-validação pode representar uma redução substancial no tempo de trabalho de campo.

Na tabela 3.1 são apresentados os resultados obtidos nas duas primeiras fases da criação do inventário de fontes de desabamentos. Como se pode verificar, não existe uma grande diferença entre os elementos que foram inicialmente identificados sobre os ortofotomapas e aqueles que foram pré-validados (47 polígonos, no total), com maior destaque no que respeita à identificação de blocos desabados, que sofreram uma redução de cerca de 8% no processo de pré-validação.

Tabela 3.1 – Inventário de desabamentos sobre ortofotomapa e pré-validado.

Inventário de movimentos de vertente				
Tipo	Interpretação de ortofotomapa	Pré-validação	Diferença	
			Nº	%
Fontes	84	84	0	0
Blocos	353	324	29	8.22
Depósito de blocos	348	333	15	4.31
Total (polígonos)	784	737	47	5.99

Na figura 3.2 são apresentados alguns exemplos das delimitações efectuadas no processo de inventariação com foto-interpretação. Foram identificadas e delimitadas as áreas de rotura como “Fontes” de desabamentos (exemplo A), as áreas de acumulação sob a forma de “Bloco” isolado (exemplo C) quando estes apresentavam entre si uma distância que permitisse a delimitação independente; no caso contrário, foram delimitados numa área maior de forma a abranger todo o depósito, sendo neste caso identificados como “Depósito” de blocos (exemplo B).



Figura 3.2 – Exemplos de delimitação na inventariação (A – “Fontes” de desabamentos; B – “Depósito” de blocos; C – “Blocos” isolados).

A figura 3.3 apresenta o inventário com todas as ocorrências, mas apenas as Fontes foram validadas no campo, uma vez que apenas estas eram necessárias para desenvolver os procedimentos de modelação e validação da cartografia de susceptibilidade à ocorrência de desabamentos.

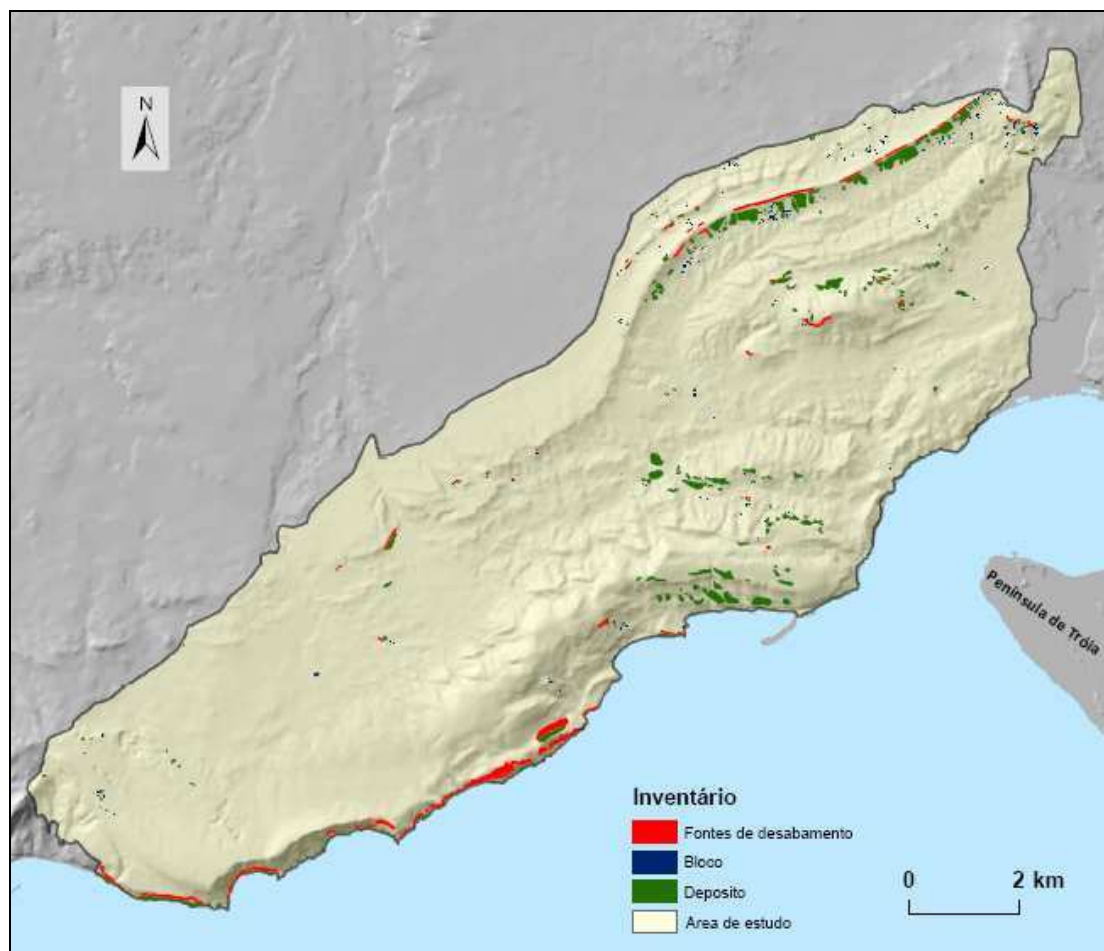


Figura 3.3 – Inventário de ocorrências de deslizamentos registadas na área de estudo.

3 – Validação do inventário de fontes de deslizamentos

O processo de validação do inventário de fontes de deslizamentos corresponde a uma das tarefas mais importantes na análise da susceptibilidade, uma vez que no final deste processo se assume que os movimentos identificados, bem como os seus limites, estão devidamente assinalados e em conformidade para avançar para os restantes procedimentos da modelação. A validação de campo decorreu durante o mês de Abril de 2012, tendo sido visitadas todas as áreas identificadas como duvidosas, na fase de pré-validação. A observação directa fornece uma perspectiva realista dos elementos presentes na paisagem que dificilmente é obtida pelas diferentes técnicas de detecção remota. Na figura 3.4 apresentam-se os exemplos A e B, em que um afloramento calcário de idade miocénica origina um declive local próximo de 90° e onde é possível identificar as áreas de rotura. Os exemplos C e D ilustram uma série de blocos desabados, que fornecem uma perspectiva dimensional dos mesmos, bem como a sua posição na vertente.



Figura 3.4 – Exemplos de fontes e de depósitos de desabamentos na Arrábida.

A tabela 3.2 sintetiza as fontes de desabamentos validadas no campo. Considerou-se que as evidências de localização dos blocos isolados desabados e dos depósitos de desabamento obtidas por foto-interpretação e pré-validação eram suficientemente claras para obviar a validação no terreno.

Tabela 3.2 – Inventário de desabamentos sobre ortofotomapa, pré-validado e validado no campo.

Inventário de movimentos de vertente			
Tipo	Interpretação de ortofotomapa	Pré-validação	Validação no campo
Fontes	84	84	80
Blocos	353	324	-----
Depósito de blocos	348	333	-----
Total (polígonos)	784	737	-----

A figura 3.5 mostra a distribuição espacial das fontes de desabamentos, após validação no campo, sendo evidente a sua concentração ao longo de três eixos fundamentais, que correspondem, de Norte para Sul: (i) Serras do Louro e de São Francisco; (ii) Serras de São Luís e Gaiteiros; (iii) Serras do Risco e do Formosinho.

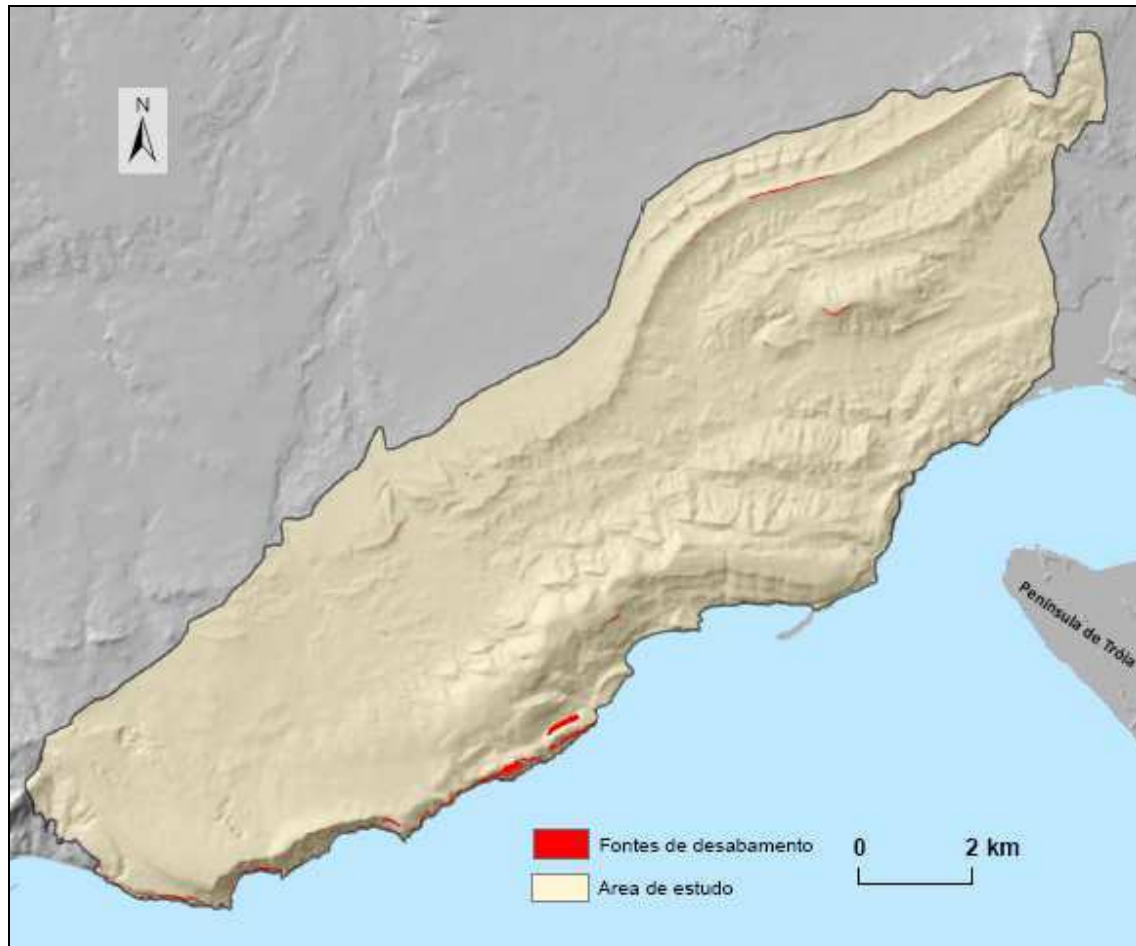


Figura 3.5 – Distribuição espacial das fontes de desabamentos na Arrábida.

4 – Bases cartográficas e modelo conceptual de pré-processamento de variáveis

A tabela 3.3 sistematiza a informação das bases cartográficas utilizadas nos processos de inventariação de movimentos de vertente, na modelação e na validação da susceptibilidade à ocorrência de desabamentos. Refira-se que os processos de modelação implicam que, numa primeira etapa, se defina o tipo e a dimensão das unidades cartográficas a utilizar. Na presente dissertação optou-se por unidades matriciais em células de 5x5m, ou seja, 25m².

Tabela 3.3 – Bases cartográficas utilizadas.

Base Cartográfica	Fonte	Escala
Ortofotomapas Digitais (2004)	Instituto Geográfico Português (IGP)	Resolução 0,5m
Altimetria	Instituto Geográfico Português (IGP)	1: 10 000
Carta de Ocupação do Solo COS 2007 (Nível II)	Instituto Geográfico Português (IGP)	1: 25 000
Carta Geológica de Portugal	Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG)	1: 25 000

Os ortofotomapas digitais, com uma resolução espacial de 0,5m, serviram de base à delimitação da área de estudo, bem como ao inventário das áreas de rotura e dos depósitos de desabamentos.

Independentemente da metodologia seguida na análise da susceptibilidade, todas as variáveis devem ser sujeitas a uma fase prévia de pré-processamento que permita que estas estejam em conformidade entre si. O pré-processamento inclui procedimentos simples de transformação de sistemas de representação (vectorial/matricial), a derivação de nova informação, classificação e reclassificação de dados. A figura 3.6 esquematiza o modelo conceptual seguido no que se refere aos procedimentos realizados com vista à integração das variáveis em projecto SIG, tendo estas sido limitadas à área de estudo previamente criada e ajustadas à unidade cartográfica definida em célula de 5x5m.

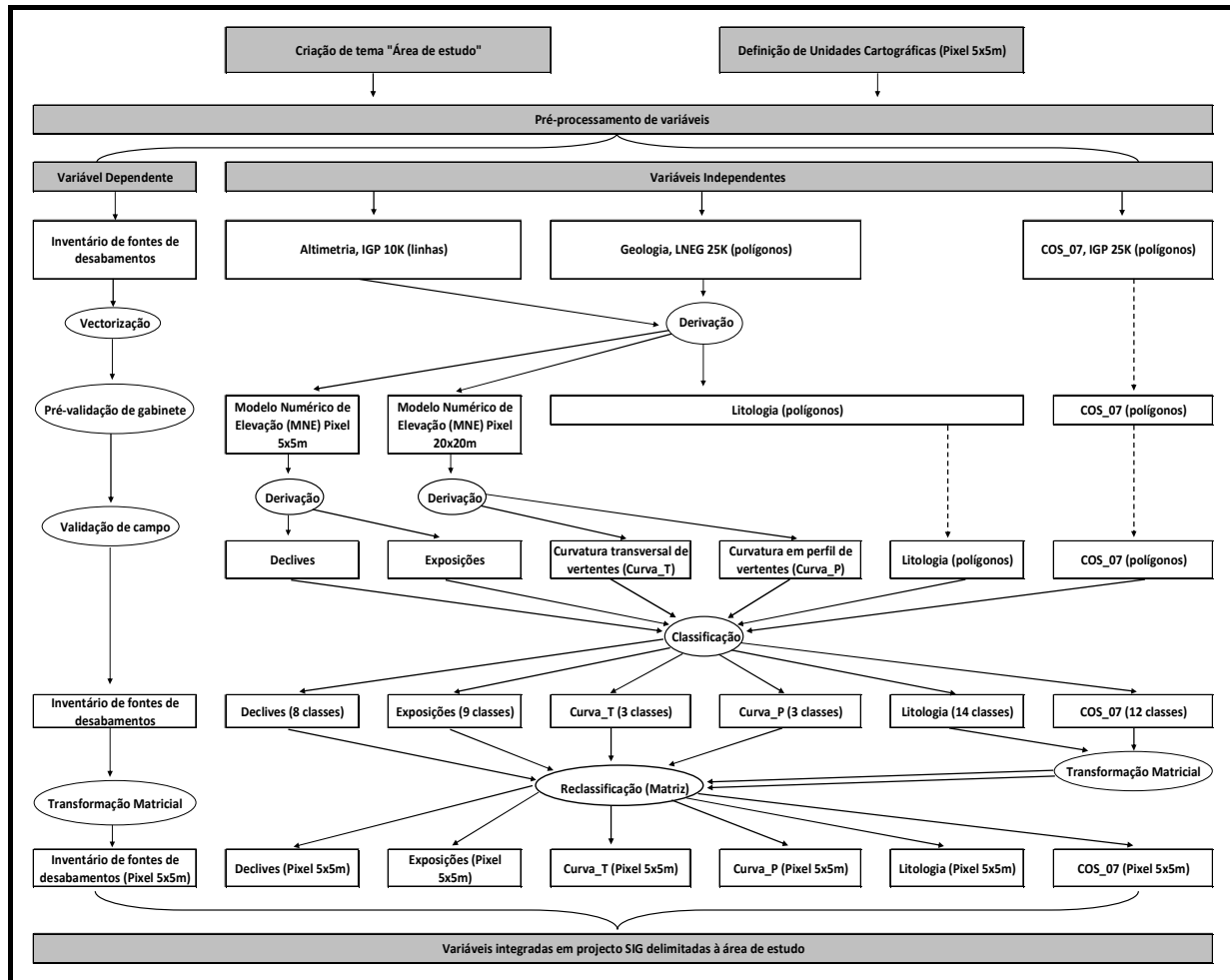


Figura 3.6 – Modelo conceptual utilizado no pré-processamento das variáveis. (Nas formas circulares estão descritos os procedimentos e nas formas rectangulares os resultados).

4.1 – A variável dependente

Na figura 3.6, a coluna da esquerda diz respeito à variável dependente, para a qual foi necessário criar uma base de dados onde foram armazenadas as referências cartográficas e geométricas de cada um dos elementos a delimitar. Após a criação da base de dados, e com a incorporação dos ortofotomapas no projecto, foram vectorizados os limites correspondentes às áreas de rotura (Fontes), as áreas de acumulação (Depósito) e as áreas de blocos isolados (Blocos). Como já foi referido, todas as ocorrências assinaladas foram sujeitas a um processo de pré-validação, ainda no gabinete, e posteriormente esclarecidas no campo, onde foram ajustados alguns dos limites das fontes dos desabamentos. Após a validação de campo, a variável dependente foi sujeita a uma transformação matricial para pixel de 5x5m.

4.2 – As variáveis independentes

No processo de modelação e validação da susceptibilidade à ocorrência de desabamentos foram utilizadas seis variáveis independentes ou factores de predisposição, para estabelecer as relações estatísticas entre estas e a variável dependente.

Com base na Altimetria, originalmente em estrutura de dados vectoriais, foi derivado o Modelo Numérico de Elevação (MNE) numa estrutura de dados matriciais, tendo este sido derivado com duas resoluções, em células de 5x5m e células de 20x20m. No primeiro caso, a partir do modelo foi derivado o mapa de declives e o mapa de exposições. Quanto a classificação do mapa de declives, necessária para utilizar nos restantes processos de modelação, seguiu-se o exemplo de Jaboyedoff e Labiouse (2011), que sugerem que o ângulo da linha de energia pode variar entre 22° e 37° no caso dos desabamentos, e entre 10° e 15° no caso das avalanches rochosas. Adicionalmente, foi considerado o trabalho de Spadari *et al.* (2012), que efectuaram um estudo *in situ* em vertentes naturais com inclinações que variavam entre os 17° e os 31° em Nova Gales do Sul na Austrália. Desta forma, optou-se por utilizar o valor de referência de 15° para definir o limite da primeira classe, assumindo-se que abaixo deste valor não se reúnem condições para a ocorrência de desabamentos. As restantes classes foram definidas com um mesmo intervalo de classe de 5° até ao limite superior da sétima classe (40° – 45°). O limite para a definição da última classe (> 45°) foi definido considerando o trabalho de Dorren (2003), que indica que abaixo dos 45° apenas é expectável a ocorrência de rolamento dos blocos na vertente, enquanto que os movimentos de saltação e queda livre apenas se verificam com valores de declive superiores a 45°. Quanto a classificação do mapa de exposições, optou-se por efectuar uma divisão em nove classes, com base nas oito principais orientações, em octantes (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW), e com a introdução de mais uma classe respeitante às áreas planas ou sem orientação, tal com descrito em Zêzere *et al.* (2004).

A partir do segundo modelo foram derivadas três tipos de curvatura de vertentes: curvatura tridimensional (3D), curvatura transversal das vertentes e curvatura em perfil das vertentes. As curvaturas de vertentes foram derivadas de um modelo de terreno com resolução mais grosseira (400m²), uma vez que esta demonstrou uma

maior aproximação à realidade da vertente. Estes temas foram posteriormente reclassificados para célula de 5x5m, sem transformação do valor inicial, para estar em conformidade com as restantes. No caso da curvatura 3D, constatou-se que a informação se tornava redundante face às outras duas curvaturas de vertente (transversal e em perfil), pelo que se optou por eliminar esta variável. Quanto a classificação desta variável, em três classes, baseou-se na utilização de valores de limite de classe que permitissem marcar, claramente, a separação entre vertentes côncavas, rectilíneas/planas e convexas. Para tal, foram utilizados valores abaixo de -0.05 (vertentes côncavas), entre -0.05 e 0.05 (vertentes rectilíneas e áreas planas) e acima de 0.05 (vertentes convexas).

A Carta de Ocupação do Solo (COS 2007), em estrutura de dados vectorial, foi utilizada directamente com a informação de nível II, tendo apenas sido agregadas as classes de “Águas interiores” e “Águas marinhas e costeiras” numa única classe designada por “Planos de água” (Tabela 3.4), o que resultou na criação de doze (12) classes de uso e ocupação do solo.

Tabela 3.4 – Classificação das unidades de ocupação de solo.

COS 07 Nível II	Legenda Cos 07	Classes de ocupação de solo	Unidade de ocupação de solo (UOS)
1.1	Tecido urbano	Tecido urbano	UOS_1
1.2	Indústria, comércio e transportes	Indústria, comércio e transportes	UOS_2
1.3	Áreas de extracção de inertes, áreas de deposição de resíduos e estaleiros de construção	Áreas de extracção de inertes, áreas de deposição de resíduos e estaleiros de construção	UOS_3
1.4	Espaços verdes urbanos, equipamentos desportivos, culturais e de lazer, e zonas históricas	Espaços verdes urbanos, equipamentos desportivos, culturais e de lazer, e zonas históricas	UOS_4
2.1	Culturas temporárias	Culturas temporárias	UOS_5
2.2	Culturas permanentes	Culturas permanentes	UOS_6
2.3	Pastagens permanentes	Pastagens permanentes	UOS_7
2.4	Áreas agrícolas heterogéneas	Áreas agrícolas heterogéneas	UOS_8
3.1	Florestas	Florestas	UOS_9
3.2	Florestas abertas e vegetação arbustiva e herbácea	Florestas abertas e vegetação arbustiva e herbácea	UOS_10
3.3	Zonas descobertas e com pouca vegetação	Zonas descobertas e com pouca vegetação	UOS_11
5.1	Águas interiores	Planos de água	UOS_12
5.2	Águas marinhas e costeiras	Planos de água	

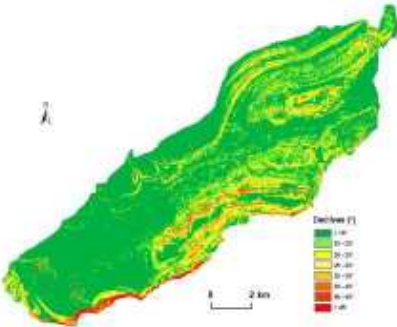
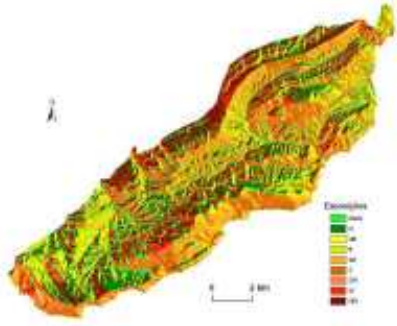
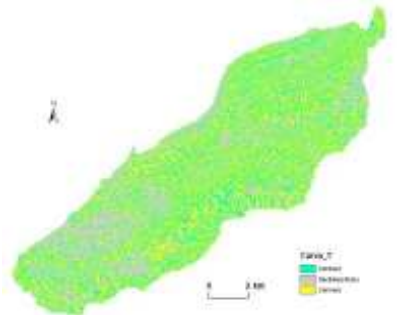
Com base na Carta Geológica de Portugal, e a partir das formações geológicas aí referenciadas, foi criada uma nova classificação de forma a transformar as classes geológicas em classes litológicas. Dos agrupamentos efectuados resultaram as catorze (14) unidades litológicas sistematizadas na Tabela 3.5.

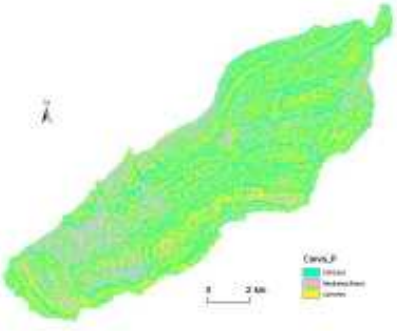
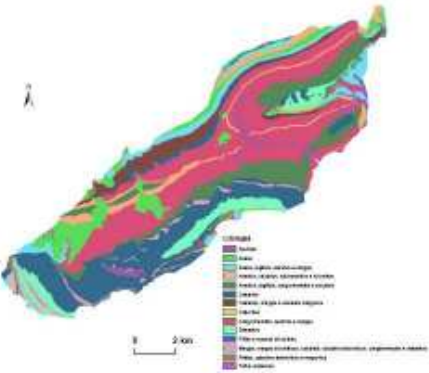
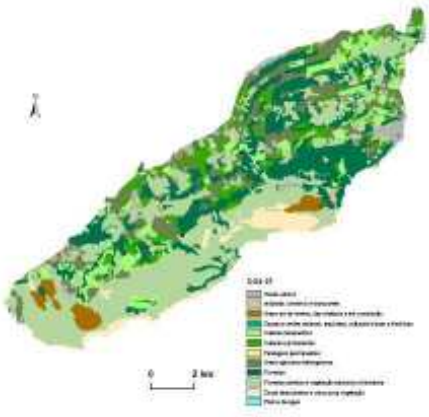
Tabela 3.5 – Classificação das unidades Litológicas.

Geologia	Litologia	Classes de Litologia	Unidade Litológica (UL)
Aluviões, aterros	Aluviões	Aluviões	UL1
Areias de praia	Areias	Areias	UL2
Areias da Quinta da Torre	Areias		
Formação de Santa Marta: areias	Areias		
Areias e margas de Quinta do Anjo	Areias e margas	Areias, argilitos, arenitos e margas	UL3
Formações de Ulme e de Tomar indiferenciadas: areias, arenitos e argilitos	Areias, arenitos e argilitos		
Formação do Rodízio: pelitos, arenitos e conglomerados	Argilitos e arenitos		
Arenitos e calcoarenitos de Pinhel e Castelo de Palmela	Argilitos e margas		
Formação de Fonte Grada: arenitos, conglomerados e pelitos	Arenitos e calcários	Arenitos, calcários, calcoarenitos e dolomitos	UL4
Formação de Vale de Lobos e de Guia indiferenciadas: arenitos, pelitos e calcários	Arenitos e calcoarenitos		
Formação de Porto da Calada: arenitos, pelitos, calcários e dolomitos	Arenitos, pelitos e calcários		
Argilas, grés, conglomerados e calcários de Vale de Rasca	Arenitos, pelitos, calcários e dolomitos		
Argilitos e arenitos de transição	Arenitos, conglomerados e pelitos	Arenitos, argilitos, conglomerados e calcários	UL5
Formação de Marco Furado: argilitos e conglomerados	Argilas, grés, conglomerados e calcários		
Argilitos e margas de Azeitão	Argilitos e conglomerados		
Calcários da Senhora das Necessidades	Calcários	Calcários	UL6
Calcários de Azóia	Calcários		
Formação de Pedreiras: calcários	Calcários		
Calcários e margas de Galé	Calcários e margas	Calcários, margas e calcários margosos	UL7
Calcários margosos de Palhavã	Calcários margosos		
Depósitos de vertente	Coluviões	Coluviões	UL8
Conglomerados de Guarda-Mor	Conglomerados	Conglomerados, arenitos e margas	UL9
Conglomerados de Comenda	Conglomerados		
Conglomerados, arenitos e margas de Picheleiros	Conglomerados, arenitos e margas		
Dolomitos de Cabo de Ares (Formação de Achada)	Dolomitos	Dolomitos	UL10
Dolomitos de Califórnia (Formação de Achada)	Dolomitos		
Dolomitos de Sesimbra (Formação de Sesimbra)	Dolomitos		
Dolomitos do Convento e de São Luís (Formação de Achada)	Dolomitos		
Formação de Dagorda: dolomitos em plaquetas	Dolomitos		
Filões e massas de dolerito	Filões e massas de dolerito	Filões e massas de dolerito	UL11
Margas dolomíticas e calcários dolomíticos com braquípodes de Meia Velha (Formação de Sesimbra)	Margas dolomíticas e calcários dolomíticos	Margas, margas dolomíticas, calcários, calcários dolomíticos, conglomerados e dolomitos	UL12
Formação de Maceira: margas e calcários	Margas e calcários		
Margas, argilas, calcários com calhaus negros e conglomerados de Arrábida	Margas, argilas, calcários e conglomerados		
Margas, calcários oolíticos e dolomitos com Gervília (Formação de Achada)	Margas, calcários e dolomitos		
Formação de Dagorda: pelitos, calcários dolomíticos e evaporitos	Pelitos, calcários dolomíticos e evaporitos	Pelitos, calcários dolomíticos e evaporitos	UL13
Complexo vulcano-sedimentar	Tufos vulcânicos	Tufos vulcânicos	UL14

Na tabela 3.6, são apresentadas as variáveis independentes sob a forma de uma representação gráfica, bem como as classes que foram criadas e o respectivo código numérico atribuído a cada uma delas. Para além disso, são apresentados os valores de área ocupada em km², bem como o número de células de cada classe. As variáveis foram sujeitas aos procedimentos expostos no modelo conceptual de pré-processamento e delimitadas à área de estudo, considerando-se nesta fase prontas para integração e aptas para desenvolver os restantes procedimentos de modelação e validação da susceptibilidade à ocorrência de desabamentos.

Tabela 3.6 – Bases cartográficas classificadas e prontas para integração e projecto SIG.

Variável	Representação Gráfica	Classes	Código	Área km ²	Células (nº)
Declives (°)		< 15	1	78.5	3140116
		]15 - 20]	2	14.5	581144
		]20 – 25]	3	10.5	420455
		]25 - 30]	4	6.5	259575
		]30 – 35]	5	3.5	138758
		]35 - 40]	6	1.8	71034
		]40 – 45]	7	0.9	36458
		> 45	8	1.3	50946
Exposições		PLANO	1	8.9	354434
		N	2	16.8	670154
		NE	3	11.2	449512
		E	4	11.0	441957
		SE	5	16.7	669010
		S	6	14.5	579183
		SW	7	9.9	396355
		W	8	10.1	405966
		NW	9	18.3	731915
Curva_T		Concava	1	41.3	1650905
		Rectilínea/Plana	2	29.0	1158240
		Convexa	3	47.1	1883508

Curva_P		Concava	1	43.0	1718265
		Rectilínea/Planao	2	25.2	1006468
		Convexa	3	49.2	1967920
Litologia		Aluviões	1	10.03	401254
		Areias	2	7.51	300266
		Areias, argilitos, arenitos e margas	3	5.92	236726
		Arenitos, calcários, calcoarenitos e dolomitos	4	2.85	114124
		Arenitos, argilitos, conglomerados e calcários	5	6.50	260136
		Calcários	6	34.77	1390730
		Calcários, margas e calcários margosos	7	15.30	612142
		Coluviões	8	0.24	9579
		Conglomerados, arenitos e margas	9	23.92	956701
		Dolomitos	10	7.18	287284
		Filões e massas de dolerito	11	0.13	5173
		Margas, margas dolomíticas, calcários, calcários dolomíticos, conglomerados e dolomitos	12	2.88	115238
		Pelitos, calcários dolomíticos e evaporitos	13	0.09	3627
		Tufos vulcânicos	14	0.12	4951
COS 07		Tecido urbano	1	5.2	206238
		Indústria, comércio e transportes	2	1.0	38142
		Áreas extracção de inertes, depósitos de resíduos e estaleiros de construção	3	3.3	130295
		Espaços verdes urbanos, equipamentos desportivos, culturais e lazer zonas históricas	4	0.1	3176
		Culturas temporárias	5	7.8	312963
		Culturas permanentes	6	9.9	397111
		Pastagens permanentes	7	0.2	9316
		Áreas agrícolas heterogêneas	8	15.1	602968
		Florestas	9	26.5	1061025
		Florestas abertas e vegetação arbustiva e herbácea	10	43.4	1734199
		Zonas descobertas e com pouca vegetação	11	5.0	201099
		Planos de água	12	0.03	1399

CAPÍTULO 4 – MODELAÇÃO, VALIDAÇÃO E ANÁLISE DA CARTOGRAFIA DE SUSCEPTIBILIDADE À OCORRÊNCIA DE DESABAMENTOS

1 – A susceptibilidade à ocorrência de movimentos de vertente

Na concepção de Soeters e Van Westen (1996) “Susceptibilidade” corresponde à incidência espacial do perigo, “representando a propensão de uma determinada área ser afectada por um determinado perigo, em tempo indeterminado, sendo esta avaliada através dos factores de predisposição (inerentes ao território), para a ocorrência de determinado processo ou acção, não contemplando o seu período de retorno ou a probabilidade de ocorrência” (Zêzere, 2005, p. 81).

A criação de um modelo de susceptibilidade é o objectivo central de uma análise de susceptibilidade à ocorrência de um qualquer fenómeno. O modelo obtido é o resultado da aplicação de uma metodologia que, por sua vez, contempla uma série de procedimentos analíticos.

No caso dos movimentos de vertente, a avaliação da susceptibilidade poderá ser efectuada com recurso a métodos de cartografia directa ou indirecta. A avaliação da susceptibilidade implica a produção de mapas de zonamento, ou seja, toda a área de estudo é classificada e hierarquizada com diferentes níveis de susceptibilidade, definidos com base na relação entre os movimentos de vertente (presença ou ausência) e uma série de variáveis explicativas (factores condicionantes ou de predisposição). Cascini (2008) alerta para o facto de que o método utilizado deverá ter em conta a escala a que o zonamento será aplicado, e propõe para escala média (1:100 000 a 1:25 000) um zonamento regional, com objectivo informativo ou para aconselhamento aos gestores do território.

No caso da cartografia directa a avaliação é feita sobre mapas geomorfológicos de pormenor onde, por princípio, deverão estar registados todos os movimentos ocorridos na área de estudo, constituindo um inventário. O resultado final depende em grande parte do critério aplicado e das capacidades de reconhecimento no terreno de evidências da existência do fenómeno. Embora não se questione a capacidade dos técnicos envolvidos, um dos problemas que se colocam na fase de inventariação é o

carácter, muitas vezes efémero, das evidências no terreno. Por outro lado, quando se identificam marcas de instabilidade no terreno (*e.g.* cicatrizes, fendas, lombadas no terreno) pode ser difícil definir os seus limites, especialmente quando se trata de áreas agrícolas em que as marcas no terreno são fácil e rapidamente eliminadas quando se recorre à utilização de maquinaria agrícola. Uma limitação crítica dos métodos de cartografia directa reside na impossibilidade de validação imediata dos mapas de susceptibilidade, ou seja, os mapas produzidos desta forma só podem ser validados à posteriori, com a ocorrência de novos movimentos de vertente na área de estudo (Piedade, 2009).

A cartografia indirecta utiliza três tipos de métodos (Pantha *et al.*, 2008): métodos de indexação, métodos de base estatística e métodos determinísticos. Segundo Cascini (2008), os métodos indirectos podem ser classificados ainda, quanto à sua complexidade e dos dados de input necessários para os gerar, em básicos, intermédios e sofisticados, todos com vantagens significativas face aos métodos de cartografia directa. Por um lado, eliminam a subjectividade inerente à cartografia directa; por outro lado, uma vez aplicados os procedimentos correctos, permitem a criação de modelos com capacidade preditiva ou de antecipação de futuras ocorrências.

Tanto na cartografia directa como na cartografia indirecta é necessária a existência de um inventário de movimentos de vertente. Uma das recomendações vai no sentido de, na fase prévia ao levantamento de campo, ser efectuada uma avaliação através da interpretação de fotografias aéreas e de ortofotomapas, com vista a determinar áreas de interesse e definir estratégias para o levantamento de campo.

Nos últimos anos, generalizou-se a utilização de métodos estatísticos na avaliação da susceptibilidade (Garcia, 2002; Piedade, 2009; Meneses, 2011). No procedimento de modelação com estes métodos, a primeira etapa consiste em definir o tipo de unidade cartográfica que será utilizada, o que Van Den Eeckhaut *et al.* (2009) designam por “mapping unit”. O termo refere-se a uma porção da superfície terrestre que contém um conjunto de condições que diferem das unidades adjacentes através de fronteiras definíveis (Guzzetti, 2005). As “Terrain Mapping Unit” (TMU) referidas por Guzzetti (2005), traduzidas por “Unidade de Terreno Cartográfica” (UTC) podendo

estas ser: células ou pixéis; unidades de condição única; unidades morfo-hidrográficas, unidades geo-hidrográficas; ou unidades administrativas.

Na segunda etapa, o inventário de movimentos de vertente é utilizado como variável dependente, e as variáveis explicativas (de predisposição) seleccionadas são utilizadas como variáveis independentes. Estas variáveis são classificadas segundo critérios definidos pelo utilizador, nomeadamente em variáveis contínuas (e.g. declive), ou através da classificação que deriva da própria informação de base, como é o caso das variáveis discretas (e.g. litologia, ocupação do solo). Posteriormente, são cruzadas ou tabuladas, na terminologia de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), as variáveis independentes com a variável dependente, permitindo a determinação da densidade de área instabilizada dentro de cada uma das classes de cada variável independente, numa análise do tipo bi-variado. Este procedimento é fundamental para ponderar cada classe dentro de cada tema independente, através de um *score*, que será posteriormente utilizado como parâmetro nas diversas equações que compõem os diversos métodos. A etapa final corresponde à criação de um mapa que representa o zonamento da susceptibilidade à ocorrência do fenómeno, mapa esse que deve ser validado e sujeito a um processo de classificação.

A validação pode ser feita através da determinação do ajuste dos resultados dos modelos aos dados que os geraram (taxas de sucesso), bem como da apreciação da sua capacidade preditiva (taxas de predição). Como verificado por Zêzere *et al.* (2004), embora a utilização da curva de sucesso possa apresentar bons resultados, esta por si só não é capaz de validar a avaliação de susceptibilidade. A partição dos dados do inventário de movimentos de vertente em subgrupos permite a sua utilização em fases distintas do processo, podendo ser criado um subgrupo que será utilizado na modelação (e que permite calcular a taxa de sucesso do modelo), e um subgrupo independente que será utilizado no processo de validação, o que permite calcular a taxa de perda do modelo. Segundo, Fabbri *et al.* (2002) e Chung e Fabbri (2003) podem ser utilizados três critérios para efectuar esta divisão: (i) aleatório (ii) espacial (iii) temporal. O pressuposto inerente à metodologia é o de que, mantendo-se as condições consideradas à altura da construção do modelo, é expectável que os futuros movimentos venham a ocorrer onde o modelo prevê, com o grau de incerteza

determinado pelos resultados das taxas de sucesso e de predição. A classificação dos resultados finais pode produzir mapas de susceptibilidade diferentes a partir dos mesmos dados de base (Garcia *et al.*, 2007). Os SIG contemplam uma série de ferramentas estatísticas que facilitam este processo. Segundo Garcia *et al.* (2007), os métodos utilizados na classificação dos dados podem ser “estritamente estatísticos” (*e.g.* quantis, igual amplitude), considerados de subjectividade reduzida, ou bastante mais subjectivos, assentes nas unidades de terreno instáveis, apresentando, neste caso, algumas alternativas, baseadas em todas as unidades instáveis ou centradas nas unidades com níveis de instabilidade elevados (Garcia *et al.*, 2007).

2 – Integração, modelação e validação da cartografia de susceptibilidade à rotura por desabamento

Um dos objectivos da presente dissertação consiste na produção da carta de susceptibilidade à ocorrência de desabamentos para a área de estudo. A variável dependente é representada pelo inventário de fontes de desabamentos e são utilizadas seis variáveis independentes (Declives; Exposições; Curvatura transversal de vertentes; Curvatura de vertentes em perfil; Litologia; Ocupação do solo). Nesta fase do trabalho são utilizadas as fontes e não os blocos desabados, uma vez que, em termos de avaliação da susceptibilidade à ocorrência de desabamentos, importa identificar, classificar e hierarquizar as áreas quanto ao seu potencial para a ocorrência de futuras roturas. Foi definida uma unidade cartográfica de representação com células de 5x5m, consideradas ajustadas ao pormenor do inventário e à escala da informação auxiliar. Quanto ao método de análise, optou-se por utilizar um método estatístico bi-variado, o Método do Valor Informativo (VI), proposto por Yin e Yan (1988). A validação dos resultados é efectuada através das taxas de sucesso e de predição e da determinação das respectivas Área Abaixo da Curva (AAC). Por último, ao nível da classificação dos resultados, são definidas quatro classes de susceptibilidade, de acordo com um critério quantitativo, através de utilização de valores limite de VI (>1 ; $0 - 1$; $-1 - 0$; <-1) com correspondência numa escala qualitativa da susceptibilidade (Muito Elevada; Elevada; Moderada; Reduzida ou Nula).

A figura 4.1 descreve, de forma esquemática, todos os procedimentos realizados para a obtenção do modelo de susceptibilidade e para a validação dos resultados. A metodologia utilizada contempla três fases distintas, que visam testar o maior número de modelos e definir quais as variáveis mais significativas na explicação da distribuição espacial dos desabamentos na área de estudo. As três fases são apresentadas nas secções seguintes.

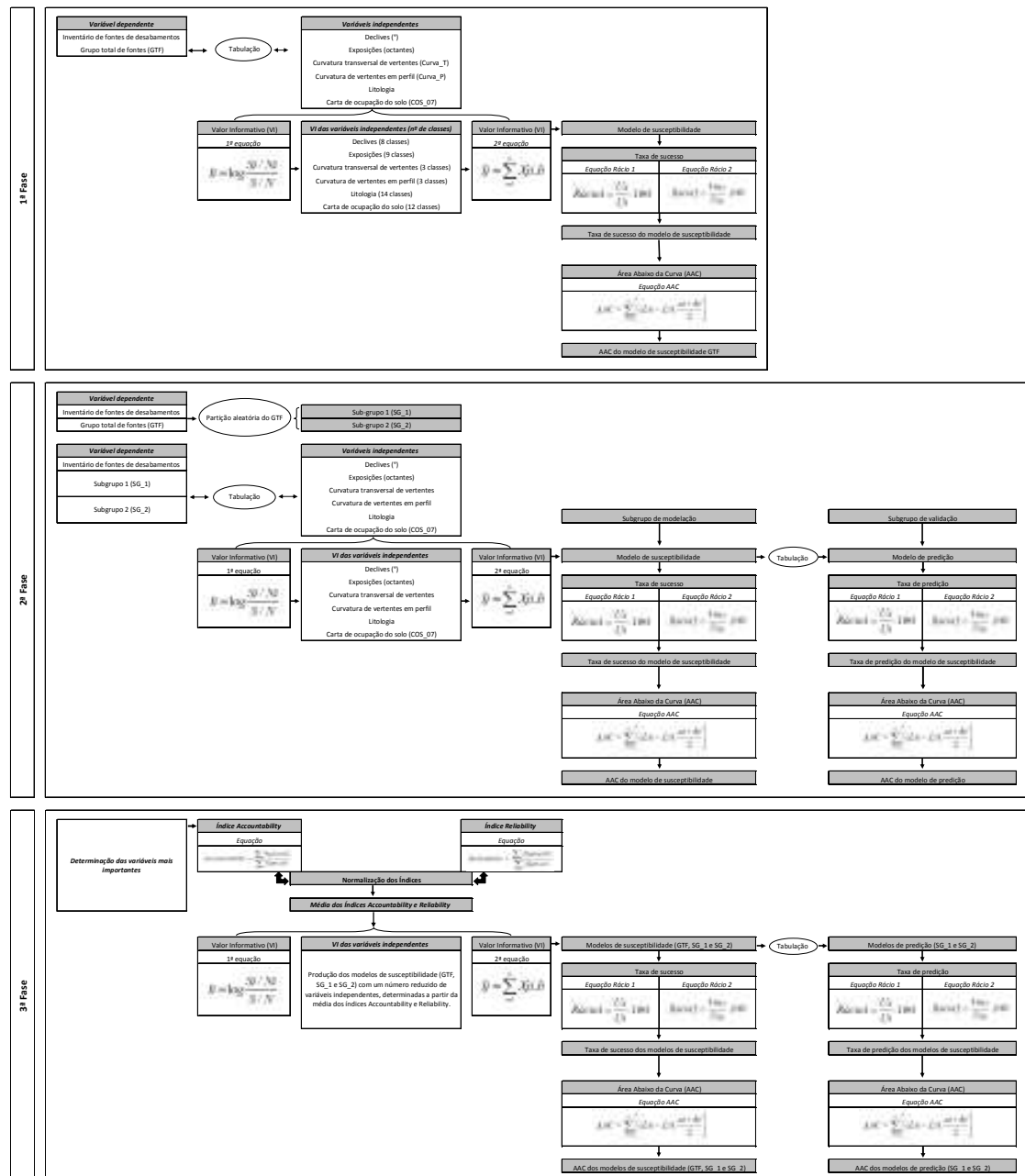


Figura 4.1 – Modelo conceptual da modelação e validação da cartografia de susceptibilidade à rotura por desabamentos.

2.1 – Procedimento metodológico – 1ª Fase: Avaliação do grau de ajuste do modelo de susceptibilidade

A ferramenta de análise espacial (*Spatial Analyst*), disponível no *ArcGis 9.3*, permite desenvolver o processo de tabulação entre variáveis, o que na prática resulta na identificação da área afectada (em m²) em cada uma das classes dos factores de predisposição, que funcionam, elas mesmas, como variáveis independentes. Desta forma, todos os factores de predisposição foram tabulados com a variável dependente e os resultados obtidos (m²) foram posteriormente traduzidos em número de células afectadas em cada uma das classes das variáveis independentes (figura 4.2).

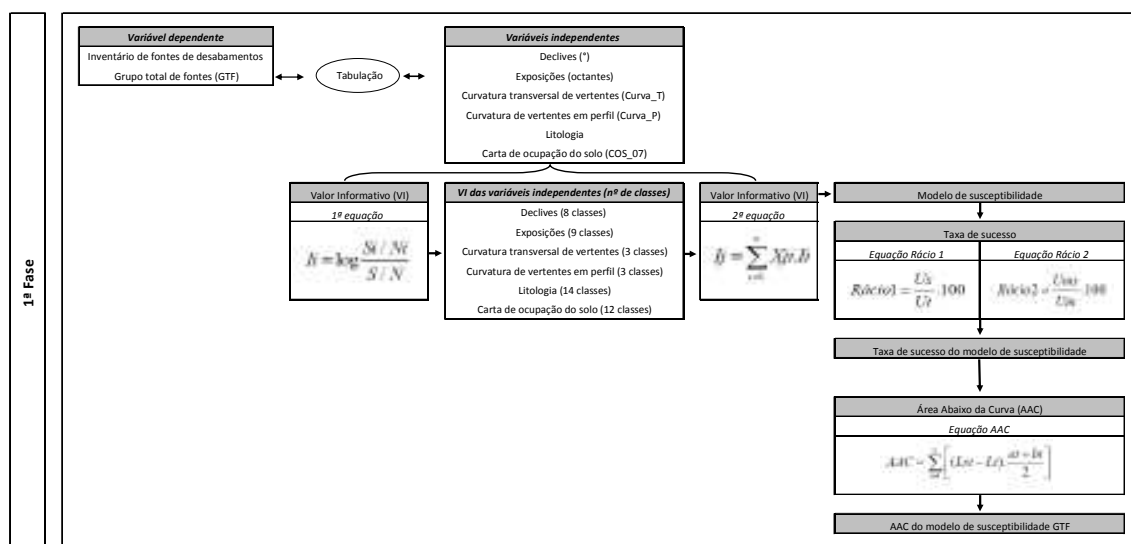


Figura 4.2 – 1ª Fase da modelação da cartografia de susceptibilidade à ocorrência de desabamentos.

Posteriormente, os resultados são exportados para aplicar as equações inerentes ao método de ponderação das variáveis, no caso o Método do Valor Informativo (figura 4.2). O método do VI atribui um «score» a cada classe dentro de cada factor de predisposição, a partir da normalização pelo logaritmo natural da razão entre a probabilidade condicionada e a probabilidade *a priori* (Zêzere *et al.*, 2009). As variáveis foram tratadas em ambiente SIG, nas fases de pré-processamento, tabulações e álgebra de mapas. Apenas o cálculo do valor informativo foi feito fora deste ambiente, sendo neste caso utilizado uma folha de cálculo da Microsoft *Office Excel 2003*, desenvolvido através da utilização das equações 1 e 2.

$$I_i = \log \frac{S_i / N_i}{S / N} \quad (\text{Eq. 1})$$

Em que:

I_i – Valor informativo de classe i do factor de predisposição Z ;

S_i – Número de células afectados por roturas de desabamentos na classe i ;

N_i – Número de células da classe i ;

S – Número total de células afectados por roturas de desabamentos na área de estudo;

N – Número total de células da área de estudo.

O VI total de cada unidade de terreno (célula) j é determinado pela equação 2.

$$I_j = \sum_{i=1}^m X_{ji} I_i \quad (\text{Eq. 2})$$

Em que:

I_j – Valor informativo da unidade de terreno j ;

m - Número de variáveis;

X_{ji} – constante que assume o valor de 0 (zero) ou 1 (um) na ausência ou na presença da variável na célula, respectivamente.

O VI obtido para cada classe de cada factor de predisposição com a equação (1) dá uma indicação quantificada, objectiva e comparável do respectivo peso no condicionamento da instabilidade. Assim, VI positivos indicam uma relação positiva entre a presença da variável e a ocorrência de roturas de desabamentos, tanto maior quanto mais elevado é o *score*. Valores de VI negativos ocorrem em variáveis cuja ocorrência tende a contrariar a ocorrência de desabamentos. Variáveis com valores de VI próximos de zero apresentam uma relação com a instabilidade próxima da probabilidade a priori, portanto, razoavelmente inconclusiva no que respeita à predição do comportamento futuro da variável dependente. (Yin e Yan, 1988; Zêzere, 2002; Piedade, 2009).

Refira-se que sempre que uma qualquer classe de um qualquer factor de predisposição não apresenta áreas afectadas por desabamentos ($S_i = 0$), o VI é indeterminável, devido à normalização logarítmica. Nestes casos, o valor do VI foi forçado ao decimal imediatamente inferior ao VI mais baixo observado no respectivo factor de predisposição.

O processo de tabulação efectuado na 1ª fase, para modelar a susceptibilidade à ocorrência de desabamentos, considerou todas as fontes inventariadas, num total de 80. Embora este modelo seja o mais robusto, uma vez que é construído com toda a informação disponível, essa situação impossibilita a avaliação da capacidade preditiva do modelo. Contudo, é possível determinar a qualidade do mesmo através do cálculo da taxa de sucesso (figura 4.2), obtida através do estabelecimento de dois rácios, com a utilização das equações (3) e (4). O rácio 1 estabelece a relação entre a área classificada como susceptível por da unidade de terreno em ordem decrescente e a área total; e o rácio 2 estabelece a relação entre a área instabilizada acumulada e a área instabilizada total. Após o cálculo da taxa de sucesso é avaliada a respectiva Área Abaixo da Curva (AAC) através da equação (5) (Bi e Bennett, 2003; Gorsevski *et al.*, 2006; Garcia *et al.*, 2007).

$$Rácio1 = \frac{U_s}{U_t} \cdot 100 \quad (Eq. 3)$$

Em que:

U_s – número acumulado de células classificadas como susceptíveis por ordem decrescente;

U_t – Número total de células na área de estudo.

$$Rácio2 = \frac{U_{ms}}{U_m} \cdot 100 \quad (Eq. 4)$$

Em que:

U_{ms} – Número acumulado de células com fontes de desabamentos;

U_m – Número total de células com fontes de desabamentos.

$$AAC = \sum_{i=1}^n \left[(L_{si} - L_i) \cdot \frac{a_i + b_i}{2} \right] \quad (Eq. 5)$$

Em que:

$(L_{si} - L_i)$ - Amplitude de área da classe.

a_i - Valor de área afectada obtido na classe L_i .

b_i - Valor de área afectada obtido na classe L_{si}

Van Den Eeckhaut *et al.* (2009) utilizam, a Área Abaixo da Curva (AAC) como uma medida quantitativa da performance dos modelos e consideram que os modelos de elevada precisão têm $AAC > 0.90$. Deste modo, este é o valor de referência utilizado na análise dos resultados dos modelos produzidos no âmbito desta dissertação.

2.2 – Procedimento metodológico – 2ª Fase: Avaliação da capacidade preditiva dos modelos de susceptibilidade

Durante a 2ª fase procedeu-se à partição do inventário de fontes de desabamentos em dois subgrupos (SG_1 e SG_2). Uma vez que é desconhecida a idade absoluta e relativa da generalidade das fontes identificadas, esta partição foi efectuada com um critério aleatório, garantindo o mesmo número de ocorrências em cada uma (40). Assim, foram seleccionadas as primeiras 40 fontes de desabamentos que constavam na base de dados do inventário, sem haver preocupação com a sua distribuição espacial ou com as respectivas dimensões (SG_1). O grupo SG_2 integra as restantes 40 ocorrências. A figura 4.3 mostra a distribuição espacial dos dois subgrupos de fontes de desabamentos na área de estudo.

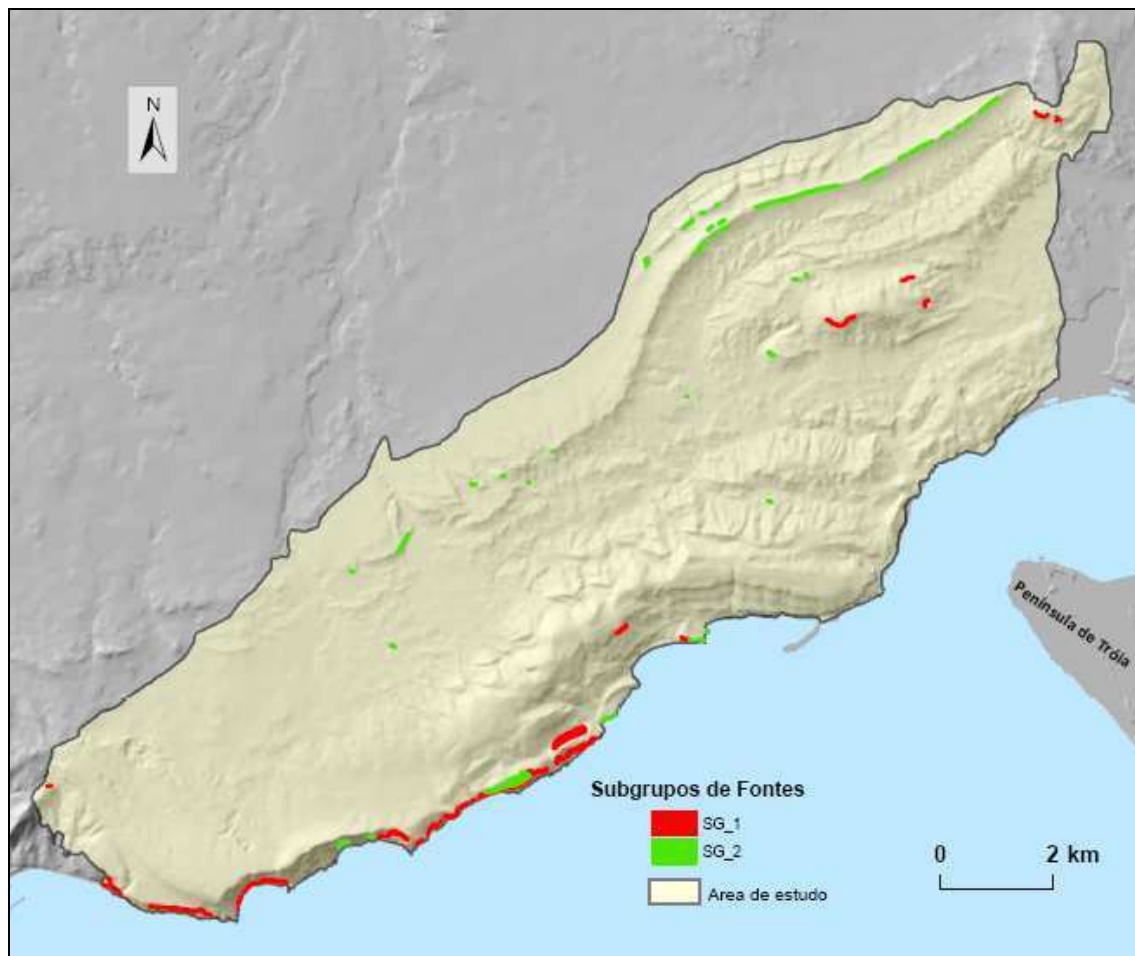


Figura 4.3 – Partição aleatória do inventário de fontes de deslizamentos em dois subgrupos (SG_1 e SG_2) e a sua distribuição espacial na área de estudo.

Na 2ª fase de modelação para cada subgrupo de fontes de deslizamentos foi considerado, alternadamente, como grupo de modelação e de validação (figura 4.4). Cada modelo produzido com um subgrupo (e.g. SG_1) foi cruzado por tabulação com os dois subgrupos (e.g. SG_1; SG_2), permitindo, no primeiro caso, determinar o grau de ajuste aos dados de origem (procedimento idêntico ao descrito na 1ª fase); e no segundo caso, a avaliação da capacidade preditiva do modelo, pelo confronto com um inventário independente de fontes de deslizamentos.

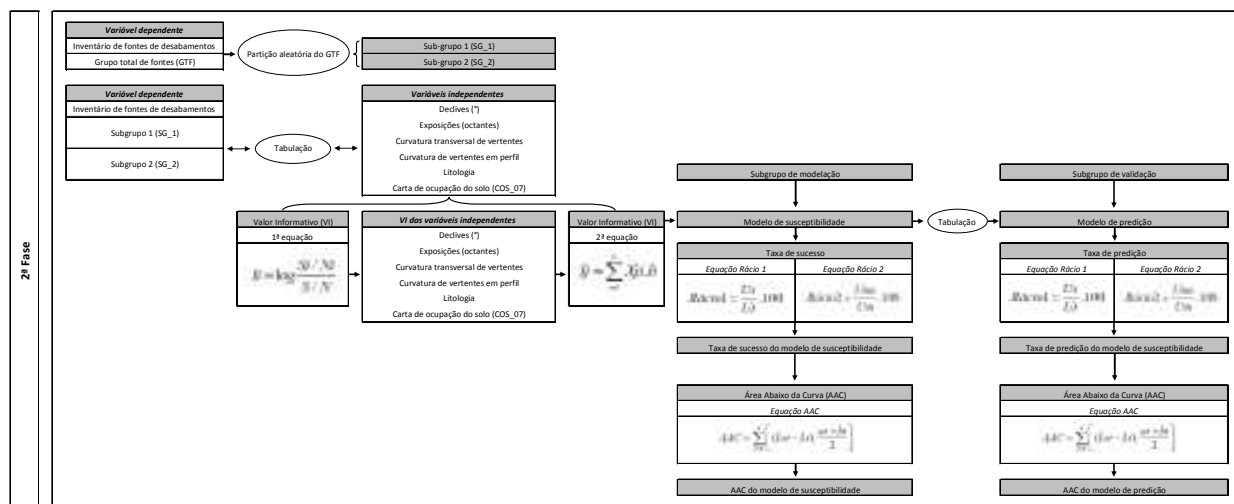


Figura 4.4 – 2ª fase da modelação e validação da cartografia de susceptibilidade à ocorrência de desabamentos, com a partição do inventário de fontes.

Deste modo, nesta fase foram realizados dois modelos de susceptibilidade, para os quais foram construídas as respectivas curvas de sucesso e de predição, e calculadas as Áreas Abaixo da Curva (AAC) correspondentes.

2.3 – Procedimento metodológico – 3ª Fase: Análise sensitiva dos factores de predisposição

Com o objectivo de determinar quais os factores de predisposição mais importantes para a rotura dos desabamentos, na 3ª Fase (figura 4.5) procedeu-se ao cálculo de dois índices, *Accountability* e *Reliability*, tal como descrito em Castellanos Abella (2008) e em Blahut *et al.* (2010), devidamente adaptadas ao método do Valor Informativo, através das equações (6) e (7), considerando o inventário total de fontes.

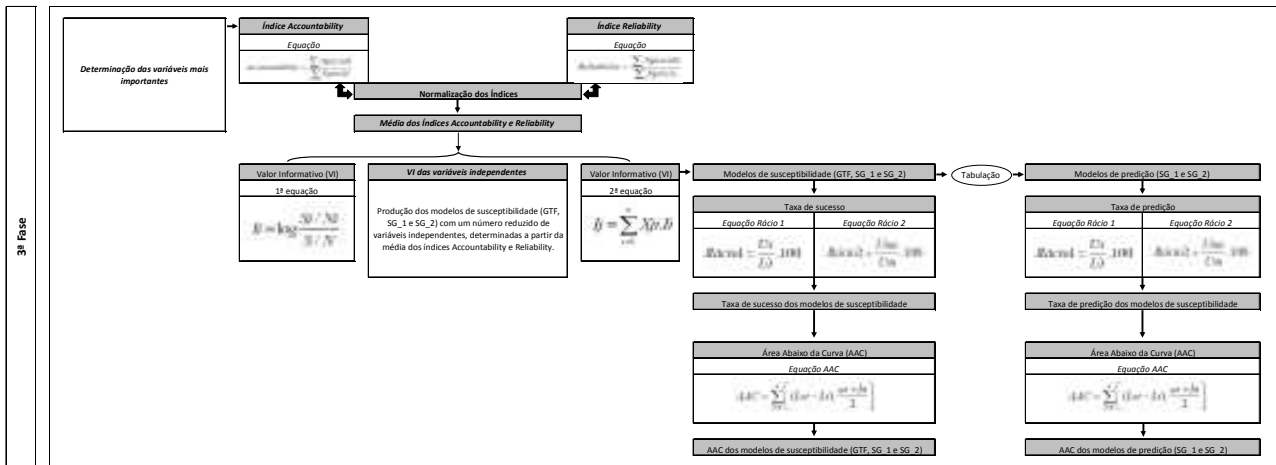


Figura 4.5 – 3ª Fase da modelação e validação da cartografia de susceptibilidade à ocorrência de desabamentos, com a determinação das variáveis mais importantes a partir dos índices *Accountability* e *Reliability*.

$$Accountability = \frac{\sum N_{pixsld1}}{\sum N_{pixsld}}$$

(Eq. 6)

$$Reliability = \frac{\sum N_{pixsld1}}{\sum N_{pixcls}}$$

(Eq. 7)

Em que:

$N_{pixsld1}$ – Número de células correspondentes a fontes de desabamentos nas classes com $VI > 0$;

N_{pixsld} – Número total de células correspondentes a fontes de desabamentos na área de estudo;

N_{pixcls} – Número total de células nas classes com $VI > 0$.

Embora ambos os índices pretendam o mesmo fim, i.e., o estabelecimento da hierarquia dos factores de predisposição, os índices produzem resultados diferentes e têm, também, uma leitura diferente. De acordo com Blahut *et al.* (2010), o índice *Reliability* é mais eficaz para hierarquizar as variáveis.

3 – Factores condicionantes dos desabamentos

Os VI foram calculados para a totalidade das fontes de desabamentos (GTF), bem como para os dois subgrupos criados de modo aleatório (SG_1; SG_2). A análise foi feita, de modo independente, para cada um dos factores de predisposição. Para cada factor são sistematizados, em tabela, a classificação, as áreas absolutas e relativas correspondentes e os VI obtidos. Adicionalmente, apresenta-se uma figura para cada tema, onde se demonstra de forma gráfica a relação existente entre os VI de cada classe e a sua distribuição relativa na área de estudo.

3.1 – Declive

O declive foi classificado em oito classes (D_1 a D_8), com intervalos regulares entre 15 e 45° e classes abertas abaixo e acima desses valores, respectivamente (tabela 4.1). As três primeiras classes (D1 a D3) apresentam VI negativos em todos os grupos de fontes (GTF, SG_1 e SG_2) nas primeiras três classes, o que significa que valores de declive inferiores a 25° não são favoráveis à geração de desabamentos na área de estudo. Nas restantes classes (D_4 a D_8) os valores de VI aumentam progressivamente e, como seria de esperar a classe D_8 (> 45°) é aquela que apresenta os valores de VI mais elevado, em todos os grupos de fontes de desabamentos.

Tabela 4.1 – Classificação, área absoluta e relativa das classes da variável Declive e respectivos valores de VI.

UNIDADES DE ANÁLISE		CLASSES	ÁREA (km ²)	ÁREA (%)	VALOR INFORMATIVO (VI)		
					GTF	SG_1	SG_2
					(80 FONTES)	(40 Fontes)	(40 Fontes)
DECLIVES (°)	D_1	< 15	78.50	66.83	-4.358	-6.622	-3.374
	D_2	]15 - 20]	14.53	12.37	-2.150	-2.351	-1.841
	D_3	]20 - 25]	10.51	8.95	-0.126	-0.089	-0.166
	D_4	]25 - 30]	6.49	5.52	0.843	0.848	0.863
	D_5	]30 - 35]	3.47	2.95	1.552	1.333	1.882
	D_6	]35 - 40]	1.78	1.51	2.012	1.641	2.481
	D_7	]40 - 45]	0.91	0.78	2.655	2.546	2.852
	D_8	> 45	1.27	1.08	3.600	3.806	3.104
Total			117.46	100			

A figura 4.6 mostra que os valores de VI aumentam progressivamente com o aumento do declive. Adicionalmente, verifica-se que a percentagem de área ocupada por cada classe diminui sistematicamente com o aumento do declive, sendo esta progressivamente menor entre as classes D_2 e D_7. As classes D_1 e D_8 não devem ser consideradas nesta comparação, uma vez que o intervalo de classe é diferente das restantes classes.

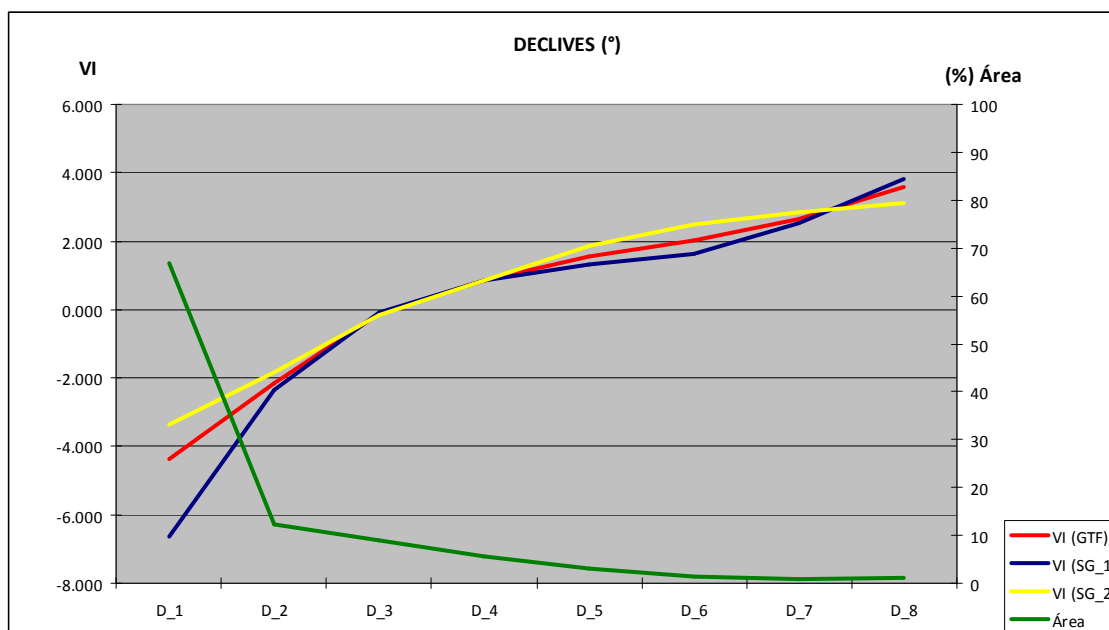


Figura 4.6 – Valores de VI e área relativa das classes da variável Declive.

3.2 – Exposição das vertentes

A exposição das vertentes foi classificada com nove classes (E_1 a E_9) (tabela 4.2). A classe E_1 corresponde às áreas planas que, como seria de esperar, não integram quaisquer fontes de desabamentos. Os valores de VI positivos significativos verificam-se nas vertentes orientadas a Sul e Sudeste, com destaque para as primeiras. No caso do grupo SG_1 ocorrem também valores positivos de VI, se bem que baixos, nas vertentes orientadas a Norte (E_2) e nas vertentes orientadas a Sudoeste (E_7).

Tabela 4.2 – Classificação, área absoluta e relativa das classes da variável Exposição das vertentes e respectivos valores de VI. A sombreado, valores de VI forçados porque Si=0.

UNIDADES DE ANÁLISE		CLASSES	ÁREA (km ²)	ÁREA (%)	VALOR INFORMATIVO (VI)		
					GTF	SG_1	SG_2
					(80 FONTES)	(40 Fontes)	(40 Fontes)
EXPOSIÇÕES	E_1	PLANO	8.86	7.54	-3.200	-4.800	-3.300
	E_2	N	16.75	14.26	-0.056	0.374	-3.252
	E_3	NE	11.24	9.57	-3.075	-3.985	-2.320
	E_4	E	11.05	9.41	-0.937	-1.432	-0.379
	E_5	SE	16.73	14.24	0.758	0.613	1.003
	E_6	S	14.48	12.33	1.142	1.008	1.372
	E_7	SW	9.91	8.44	-0.279	0.060	-1.534
	E_8	W	10.15	8.64	-3.188	-4.710	-2.286
	E_9	NW	18.30	15.58	-1.014	-0.698	-2.072
Total			117.46	100			

A figura 4.7 mostra que as 9 classes consideradas na exposição não apresentam grande variação em termos de representatividade espacial, sendo que a classe com menor representação corresponde à classe E_1 (áreas planas) com 7.5 % da área total e a classe com maior representação corresponde a classe E_9 (NW) com 15.6 % da área total. Em termos de comportamento dos grupos de fontes, é possível verificar que os grupos GTF e SG_1, apresentam, tendencialmente, valores de VI aproximados. O grupo SG_2 apresenta maior variação face aos restantes principalmente nas classes E_2 e E_3. Nas restantes classes a variação do VI segue o mesmo padrão que nos outros inventários.

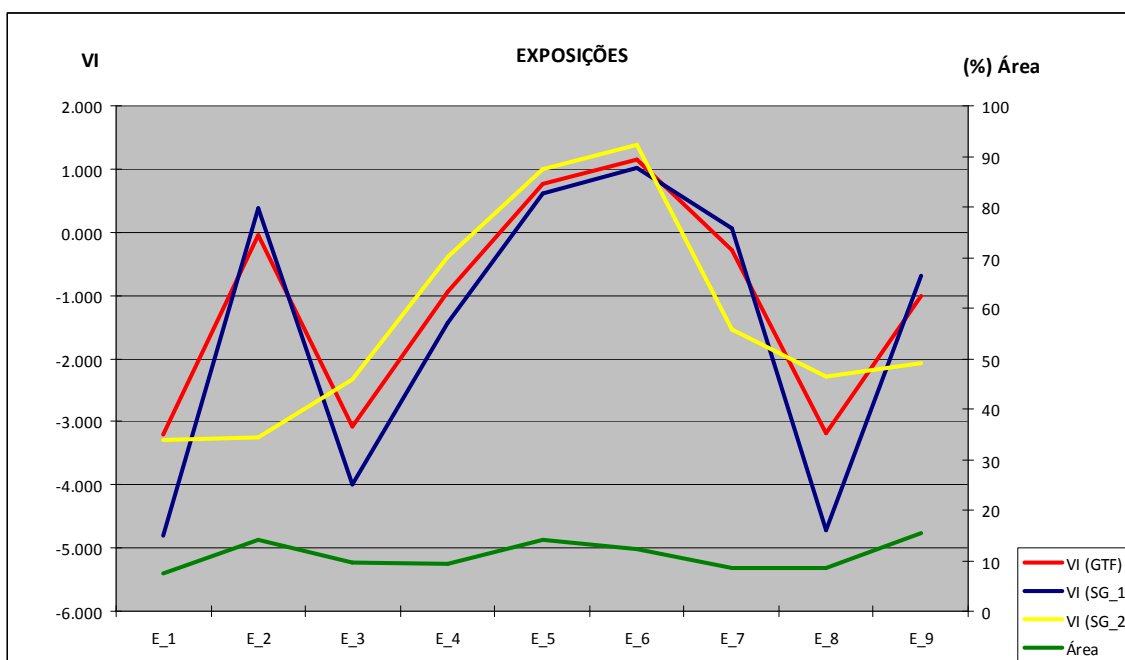


Figura 4.7 – Valores de VI e área relativa das classes da variável Exposição das vertentes.

3.3 – Curvatura transversal de vertentes (CURVA_T)

A curvatura transversal das vertentes foi classificada em 3 classes (côncava, rectilínea/plano e convexa), sendo que todas elas registam fontes de desabamentos (tabela 4.3). Os valores positivos mais elevados são encontrados nas vertentes côncavas, nos grupos GTF e SG_1. No grupo SG_2, pese embora as vertentes côncavas registem VI positivo, o valor mais elevado corresponde às vertentes com perfil transversal convexo. As curvaturas rectilíneas/planas apresentam sempre VI negativo.

Tabela 4.3 – Classificação, área absoluta e relativa das classes da variável Curvatura Transversal de Vertentes e respectivos valores de VI.

UNIDADES DE ANÁLISE		CLASSES	ÁREA (km ²)	ÁREA (%)	VALOR INFORMATIVO (VI)		
					GTF	SG_1	SG_2
					(80 FONTES)	(40 Fontes)	(40 Fontes)
CURVA_T	CV_T_1	Côncava	41.27	35.18	0.208	0.236	0.183
	CV_T_2	Rectilínea/Plano	28.96	24.68	-1.090	-1.102	-1.041
	CV_T_3	Convexa	47.09	40.14	0.167	0.164	0.200
Total			117.32	100			

A figura 4.8 explicita a situação em termos gráficos, verificando-se que o comportamento em termos de valores de VI é idêntico em todos os grupos de fontes. Em termos de áreas relativa, a classe CV_T_3 é a mais representativa com 40.1 % da área total.

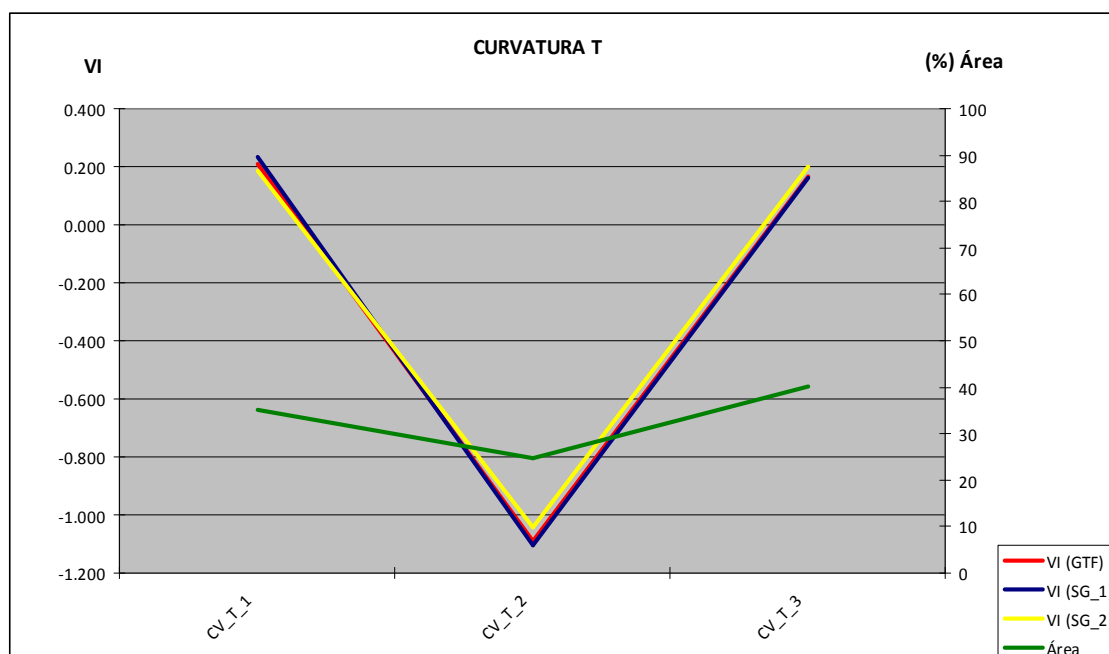


Figura 4.8 – Valores de VI e área relativa das classes da Curvatura transversal das Vertentes.

3.4 – Curvatura das vertentes em perfil (CURVA_P)

Como no caso anterior, a curvatura das vertentes em perfil foi classificada em 3 classes (côncava, rectilínea/plano e convexo) que, de igual modo, registam todas fontes de desabamentos (tabela 4.4). No entanto, ao contrário dos perfis transversais, os valores positivos mais elevados são encontrados nas vertentes convexas, nos grupos GTF e SG_1. O VI é também positivo no grupo SG_2, embora neste caso o score mais elevado se observe nas vertentes côncavas. Mais uma vez, os valores negativos são encontrados, como seria de esperar, nas áreas rectilíneas/planas.

Tabela 4.4 – Classificação, área absoluta e relativa das classes da variável Curvatura de Vertentes em Perfil e respectivos valores de VI.

UNIDADES DE ANÁLISE		CLASSES	ÁREA (km ²)	ÁREA (%)	VALOR INFORMATIVO (VI)		
					GTF	SG_1	SG_2
					(80 FONTES)	(40 Fontes)	(40 Fontes)
CURVA_P	CV_P_1	Côncava	42.96	36.62	0.165	0.103	0.295
	CV_P_2	Rectilínea/Plano	25.16	21.45	-1.436	-1.326	-1.641
	CV_P_3	Convexa	49.20	41.94	0.190	0.248	0.107
Total			117.32	100			

A figura 4.9 mostra que existe uma maior variação nos valores de VI, face à curvatura transversal, apesar de se manter a mesma tendência. Quanto à distribuição relativa na área de estudo, os valores percentuais são muito semelhantes, sendo as vertentes convexas as que se encontram melhor representadas (41.9%) na área de estudo.

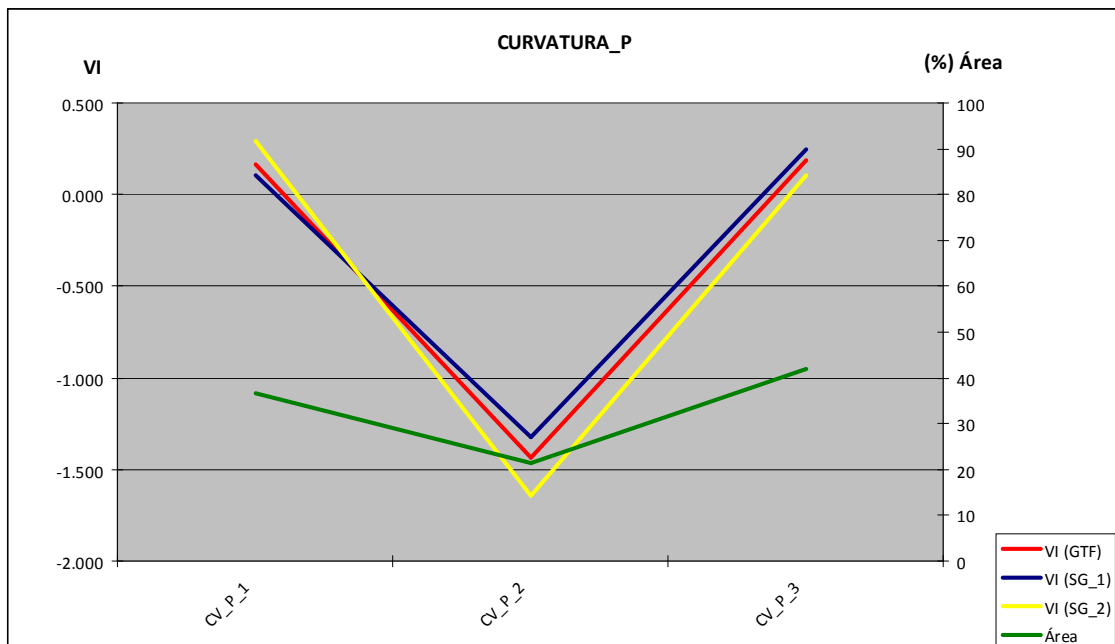


Figura 4.9 – Valores de VI e área relativa das classes da variável Curvatura de Vertentes em Perfil.

3.5 – Litologia

A informação geológica foi sistematizada em 14 classes que se encontram sistematizadas na tabela 4.5. Esta variável apresenta-se como bastante discriminante no que respeita à localização das fontes de desabamentos, sendo que os valores de VI positivos se observam apenas em 4 classes: L_12 (Margas, margas dolomíticas, calcários, calcários dolomíticos, conglomerados e dolomitos) e L_6 (Calcários), para o conjunto dos grupos (GTF, SG_1 e SG_2); L_10 (Dolomitos), para GTF e SG_1; e L_7 (Calcários, margas e calcários margosos), para SG_2.

As classes que apresentam sistematicamente ausência de fontes de desabamentos correspondem a litologias pouco consolidadas, como são os casos das Aluviões (classe L_1) e Coluviões (L_8), bem como a litologias derivadas de complexos vulcânicos (L_11, Filões e massas de dolerito; e L_14, Tufos vulcânicos). A classe L_13 (pelitos, calcários dolomíticos e evaporitos) também não apresenta fontes de desabamentos, situação que se pode associar a um efeito de escala, devido à muito reduzida expressão espacial da classe.

Tabela 4.5 – Classificação, área absoluta e relativa das classes da variável Litologia e respectivos valores de VI. A sombreado, valores de VI forçados porque Si=0.

UNIDADES DE ANÁLISE		CLASSES	ÁREA (km ²)	ÁREA (%)	VALOR INFORMATIVO (VI)		
					GTF	SG_1	SG_2
					(80 FONTES)	(40 Fontes)	(40 Fontes)
LITOLOGIA	L_1	Aluviões	10.03	8.54	-2.600	-3.300	-2.100
	L_2	Areias	7.51	6.39	-2.299	-2.442	-2.057
	L_3	Areias, argilitos, arenitos e margas	5.92	5.04	-2.500	-2.897	-2.011
	L_4	Arenitos, calcários, calcoarenitos e dolomitos	2.85	2.43	-0.649	-1.260	-0.025
	L_5	Arenitos, argilitos, conglomerados e calcários	6.50	5.54	-1.835	-3.300	-0.782
	L_6	Calcários	34.77	29.60	0.607	0.661	0.533
	L_7	Calcários, margas e calcários margosos	15.30	13.03	-0.282	-3.282	0.738
	L_8	Coluviões	0.24	0.20	-2.600	-3.300	-2.100
	L_9	Conglomerados, arenitos e margas	23.92	20.36	-1.660	-3.300	-0.607
	L_10	Dolomitos	7.18	6.12	0.735	1.180	-2.100
	L_11	Filões e massas de dolerito	0.13	0.11	-2.600	-3.300	-2.100
	L_12	Margas, margas dolomíticas, calcários, calcários dolomíticos, conglomerados e dolomitos	2.88	2.45	1.812	2.137	0.676
	L_13	Pelitos, calcários dolomíticos e evaporitos	0.09	0.08	-2.600	-3.300	-2.100
	L_14	Tufos vulcânicos	0.12	0.11	-2.600	-3.300	-2.100
Total			117.45	100			

A figura 4.10 mostra que as classes litológicas mais bem representadas na área de estudo (L_6 – Calcários; L_9 - Conglomerados, arenitos e margas e L_7 - Calcários, margas e calcários margosos) não são, na globalidade, aquelas que apresentam maior propensão para a ocorrência de desabamentos, uma vez que os VI mais elevados se registam nas classes L_12 e L_10, nomeadamente nos grupos GTF e SG_1.

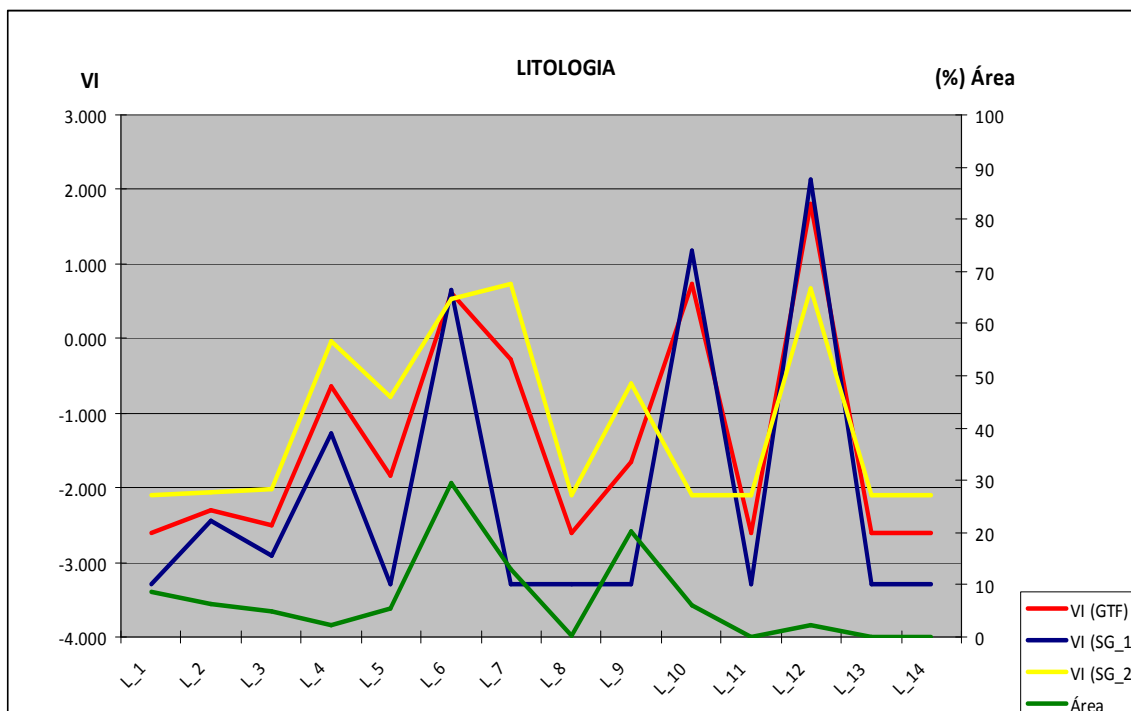


Figura 4.10 – Valores de VI e área relativa das classes da variável Litologia.

3.6 – Ocupação do solo

A ocupação do solo foi organizada em 12 classes, a partir da agregação do nível 2 da cartografia do COS 07 (tabela 4.6). Os valores de VI positivos ocorrem em apenas duas classes OS_9 e OS_11, que corresponde as áreas de floresta e às áreas descobertas ou com pouca vegetação, respectivamente, sendo que a última classe apresenta os valores mais elevados. Existem cinco classes sem fontes de desabamentos (Indústria, comércio e transportes; Espaços verdes urbanos, equipamentos desportivos, culturais e lazer zonas históricas; Culturas temporárias; Pastagens permanente; Planos de água), situação verificada em todos os grupos de fontes.

Tabela 4.6 – Classificação, área absoluta e relativa das classes da variável ocupação do solo e respectivos valores de VI. A sombreado, valores de VI forçados porque Si=0.

UNIDADES DE ANÁLISE		CLASSES	ÁREA (km ²)	ÁREA (%)	VALOR INFORMATIVO (VI)		
					GTF	SG_1	SG_2
					(80 FONTES)	(40 Fontes)	(40 Fontes)
Ocupação do Solo	OS_1	Tecido urbano	5.16	4.39	-1.848	-1.200	-0.795
	OS_2	Indústria, comércio e transportes	0.95	0.81	-3.100	-1.200	-2.000
	OS_3	Áreas extracção de inertes, depósitos resíduos e estaleiros construção	3.26	2.77	-1.176	-1.150	-1.197
	OS_4	Espaços verdes urbanos, equipamentos desportivos, culturais e lazer zonas históricas	0.08	0.07	-3.100	-1.200	-2.000
	OS_5	Culturas temporárias	7.82	6.66	-3.100	-1.200	-2.000
	OS_6	Culturas permanentes	9.93	8.45	-2.709	-1.200	-1.656
	OS_7	Pastagens permanentes	0.23	0.20	-3.100	-1.200	-2.000
	OS_8	Áreas agrícolas heterogéneas	15.07	12.83	-3.007	-1.200	-1.954
	OS_9	Florestas	26.53	22.58	0.230	0.154	0.381
	OS_10	Florestas abertas e vegetação arbustiva e herbácea	43.35	36.91	-0.668	-0.551	-0.893
	OS_11	Zonas descobertas e com pouca vegetação	5.03	4.28	2.436	2.487	2.365
	OS_12	Planos de água	0.03	0.03	-3.100	-1.200	-2.000
Total			117.45	100			

Na classe OS_1, referente às áreas de tecido urbano, seria de esperar que não fossem encontradas fontes de desabamentos nas mesmas. Contudo, existem limites de fontes coincidentes com as mesmas o que se fica a dever ao nível de generalização cartográfica do nível 2 da cartografia COS 07, como se demonstra na figura 4.11.



Figura 4.11 – Sobreposição das fontes de desabamentos às áreas de Tecido Urbano representadas no nível 2 da cartografia COS 07.

A figura 4.12 mostra que as classes mais representativas em termos de área relativa correspondem às classes Floresta (22.58 %) e Florestas abertas e vegetação arbustiva e herbácea (36.91 %), mas apenas a classe Floresta apresenta valores de VI positivo em todos os grupos. A classe Zonas descobertas e com pouca vegetação, pese embora apresentar uma área relativa significativamente menor do que as anteriores (4.28 %), é aquela que apresenta os valores de VI positivos mais elevados, em todos os grupos.

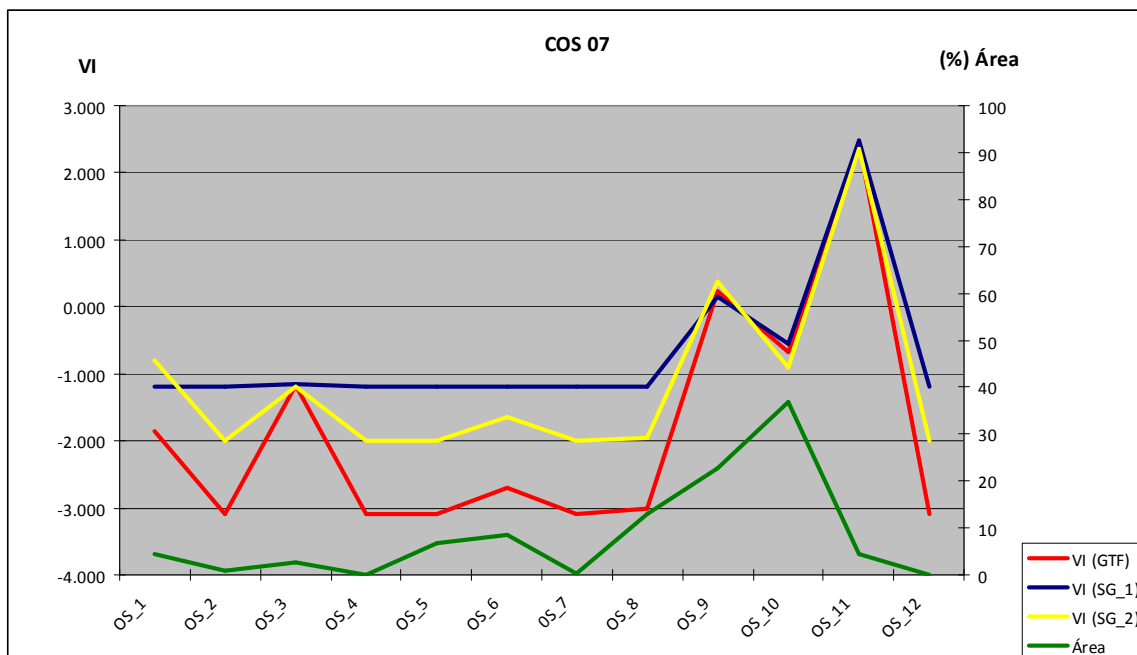


Figura 4.12 – Valores de VI e área relativa das classes da variável Ocupação do solo.

4 – Índices *Accountability* e *Reliability*

As tabelas 4.7, 4.8 e 4.9 sintetizam os valores obtidos nos cálculos dos índices *Accountability* e *Reliability*, para cada factor de predisposição, para os 3 grupos de fontes de desabamentos considerados neste trabalho. Os resultados de cada índice foram normalizados numa escala de 0 a 1, para mais fácil comparação. A hierarquia final dos factores de predisposição foi determinada pela média aritmética dos dois índices normalizados.

Tabela 4.7 – Valores dos índices *Accountability* e *Reliability* para o grupo (GTF).

GRUPO TOTAL DAS FONTES DE DESABAMENTOS (GTF)					
Variáveis	<i>Accountability</i>	<i>Accountability</i> Normalizado	<i>Reliability</i>	<i>Reliability</i> Normalizado	Média
DECLIVE	0.897	0.946	2.238	1.000	0.973
EXPOSIÇÃO	0.697	0.735	0.775	0.347	0.541
LITOLOGIA	0.829	0.874	0.642	0.287	0.581
OCUP. SOLO	0.781	0.824	0.860	0.384	0.604
CURVAT. TRA	0.916	0.966	0.360	0.161	0.563
CURVAT. PERF	0.948	1.000	0.357	0.160	0.580

Tabela 4.8 – Valores dos índices *Accountability* e *Reliability* para o subgrupo (SG_1).

1° SUBGRUPO DAS FONTES DE DESABAMENTOS (SG_1)					
Variáveis	<i>Accountability</i>	<i>Accountability</i> Normalizado	<i>Reliability</i>	<i>Reliability</i> Normalizado	Média
DECLIVE	0.905	0.924	1.463	1.000	0.962
EXPOSIÇÃO	0.897	0.916	0.349	0.238	0.577
LITOLOGIA	0.980	1.000	0.491	0.336	0.668
OCUP. SOLO	0.778	0.794	0.555	0.379	0.587
CURVAT. TRA	0.918	0.937	0.234	0.160	0.548
CURVAT. PERF	0.943	0.962	0.230	0.157	0.560

Tabela 4.9 – Valores dos índices *Accountability* e *Reliability* para o subgrupo (SG_2).

2° SUBGRUPO DAS FONTES DE DESABAMENTOS (SG_2)					
Variáveis	<i>Accountability</i>	<i>Accountability</i> Normalizado	<i>Reliability</i>	<i>Reliability</i> Normalizado	Média
DECLIVE	0.882	0.920	0.775	1.000	0.960
EXPOSIÇÃO	0.874	0.912	0.343	0.442	0.677
LITOLOGIA	0.825	0.861	0.191	0.246	0.553
OCUP. SOLO	0.786	0.820	0.305	0.393	0.607
CURVAT. TRA	0.913	0.952	0.126	0.163	0.558
CURVAT. PERF	0.958	1.000	0.127	0.164	0.582

Na análise dos resultados, e de acordo com os valores médios, verificamos que o Declive é a variável mais importante, com valores mais elevados em ambos os índices e em todos os grupos. A variável ocupação do solo corresponde à segunda mais importante, uma vez que está sempre presente entre os três valores mais elevados em todos os grupos. No conjunto das variáveis mais importantes destacam-se ainda a Litologia e a Exposição das vertentes, uma vez que a Litologia apresenta o terceiro valor médio mais elevado, no grupo GTF, e o segundo mais elevado no do grupo SG_1. A variável Exposição das vertentes demonstra importância apenas no grupo SG_2, onde apresenta o segundo valor médio mais elevado.

5 – Cartografia de susceptibilidade à ocorrência de desabamentos

O resultado final da aplicação do método do valor informativo (VI) corresponde à criação de um modelo ou mapa de susceptibilidade com o zonamento da susceptibilidade para a área de estudo. Os valores de VI calculados são, finalmente, transportados para as variáveis utilizadas e posteriormente somados na ferramenta «*Spatial Analyst – Raster Calculator*» para se obter o VI de cada unidade de terreno (célula) dando origem ao mapa de susceptibilidade.

Para cada grupo de fontes de desabamentos (GTF; SG_1; SG_2) foram realizados 3 modelos de susceptibilidade para a área de estudo: um com recurso à totalidade dos seis factores de predisposição; outro com as três variáveis mais relevantes na explicação do fenómeno (seleccionadas pela média dos índices *accountability* e *reliability* normalizados); e o último com as três variáveis menos importantes no condicionamento dos desabamentos. Estes últimos modelos, produzidos com as variáveis menos relevantes, serviram apenas para comparar os resultados, em termos de taxas de sucesso e de perda. Apesar dos valores dos índices *Accountability* e *Reliability* determinarem a hierarquia da importância das variáveis, tornava-se importante demonstrar que os resultados finais obtidos com as variáveis mais relevantes eram efectivamente mais significativos do que os produzidos com as variáveis supostamente menos importantes.

5.1 – Modelos de susceptibilidade

A tabela 4.10 sintetiza as características dos nove modelos de susceptibilidade produzidos, designadamente as variáveis utilizadas e o número de fontes de desapamentos utilizados em cada um.

Nas subsecções seguintes são apresentados os modelos produzidos e os resultados obtidos, para cada grupo de fontes de desapamentos.

Tabela 4.10 – Codificação e descrição dos modelos de susceptibilidade.

Modelo de susceptibilidade	Descrição (Nº de Fontes)
GTF	GRUPO TOTAL DE FONTES – Utilização de todas as variáveis. (80 Fontes).
SG_1	1º SUBGRUPO DE FONTES – Utilização de todas as variáveis. (40 Fontes).
SG_2	2º SUBGRUPO DE FONTES – Utilização de todas as variáveis. (40 Fontes).
GTF_DCL	Utilização das variáveis mais importantes, determinadas a partir da média dos índices <i>Accountability</i> e <i>Reliability</i> : DECLIVE, OCUPAÇÃO DO SOLO e LITOLOGIA (80 Fontes)
GTF_PTE	Utilização das variáveis menos importantes, determinadas a partir da média dos índices <i>Accountability</i> e <i>Reliability</i> : CURVATURA EM PERFIL, CURVATURA TRANSVERSAL E EXPOSIÇÃO (80 Fontes)
SG_1_DLC	Utilização das variáveis mais importantes, determinadas a partir da média dos índices <i>Accountability</i> e <i>Reliability</i> : DECLIVE, LITOLOGIA E OCUPAÇÃO DO SOLO (40 Fontes)
SG_1_EPT	Utilização das variáveis menos importantes, determinadas a partir da média dos índices <i>Accountability</i> e <i>Reliability</i> : EXPOSIÇÃO, CURVATURA EM PERFIL e CURVATURA TRANSVERSAL (40 Fontes)
SG_2_DEC	Utilização das variáveis mais importantes, determinadas a partir da média dos índices <i>Accountability</i> e <i>Reliability</i> : DECLIVE, EXPOSIÇÃO E OCUPAÇÃO DO SOLO (40 Fontes)
SG_2_LPT	Utilização das variáveis menos importantes, determinadas a partir da média dos índices <i>Accountability</i> e <i>Reliability</i> : LITOLOGIA, CURVATURA EM PERFIL e CURVATURA TRANSVERSAL (40 Fontes)

5.1.1 – Modelos de susceptibilidade do grupo total de fontes (GTF)

Para o grupo constituído pelo conjunto de fontes de deslizamentos inventariadas (tabela 4.11), foram produzidos três modelos de susceptibilidade (GTF, GTF_DCL e GTF_PTE), para os quais apenas foi possível calcular as taxas de sucesso e respectivas AAC, uma vez que neste caso não existia um grupo de movimentos independentes dos utilizados na modelação. Nos casos dos modelos GTF e GTF_DCL, as taxas de sucesso apresentam valores superiores ao limiar considerado por Van Den Eeckhaut *et al.* (2009) como referência da elevada precisão do modelo (0.90). O modelo GTF_PTE, gerado com a utilização das três variáveis menos importantes, tem uma taxa de sucesso com AAC de 0.800, logo inferior ao valor de referência, facto que confirma a baixa capacidade explicativa das variáveis independentes consideradas (exposição e curvatura transversal e em perfil das vertentes).

Tabela 4.11 – Modelos de susceptibilidade produzidos a partir do grupo GTF e AAC das respectivas taxas de sucesso.

Modelo (Nº de Fontes)	Descrição	ÁREA ABAIXO DA CURVA (AAC)	
		Taxa de sucesso	Taxa de predição
GTF (80 FONTES)	Utilização de todas as variáveis. Taxa de sucesso calculada com as fontes utilizadas na criação do modelo	0.963	.....
GTF_DCL (80 FONTES)	Utilização das variáveis mais importantes (DECLIVE, OCUPAÇÃO DO SOLO, LITOLOGIA). Taxa de sucesso calculada com as fontes utilizadas na criação do modelo	0.961	.....
GTF_PTE (80 FONTES)	Utilização das variáveis menos importantes (CURVATURA EM PERFIL, CURVATURA TRANSVERSAL E EXPOSIÇÃO). Taxa de sucesso calculada com as fontes utilizadas na criação do modelo	0.800	.....

Os resultados gráficos dos modelos são apresentados na figura 4.13. Os modelos produzidos com a totalidade dos temas condicionantes (GTF) e com as três melhores variáveis (GTF_DCL) produzem uma distribuição espacial da susceptibilidade muito semelhante, contrastando com o modelo GTF_PTE, que tem muito maior dificuldade em isolar as áreas mais perigosas, o que se reflecte no incremento dos tons avermelhados no mapa correspondente. A projecção das curvas de sucesso esclarece definitivamente a situação anterior, uma vez que nos modelos GTF e GTF_DCL (linhas azul e vermelha), as curvas apresentam um alinhamento e sobreposição quase perfeitos, enquanto o modelo GTF_PTE (linha amarela) destaca-se claramente das anteriores, o que representa valores de ajustamento inferiores.

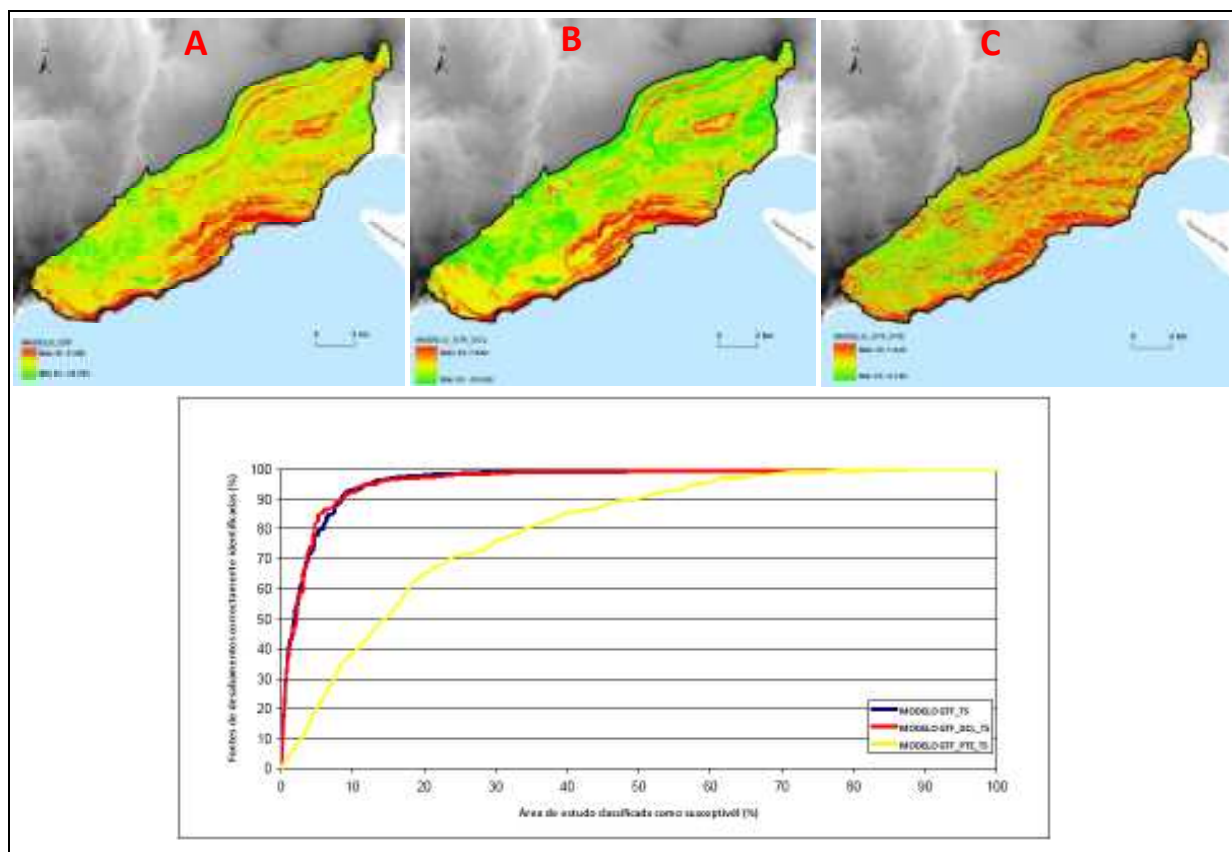


Figura 4.13 – Modelos de susceptibilidade e curvas de sucesso dos modelos GTF (A), GTF_DCL (B) e GTF_PTE (C).

5.1.2 – Modelos de susceptibilidade produzidos para o subgrupo de fontes (SG_1)

Na tabela 4.12 são apresentados os resultados obtidos com a utilização do primeiro subgrupo de fontes de desabamentos (SG_1), para o qual foram produzidos três modelos de susceptibilidade: SG_1, SG_1_DLC e SG_1_EPT. Neste caso foi possível calcular as taxas de sucesso e de predição, uma vez que estes modelos foram validados com o segundo subgrupo de fontes de desabamentos (SG_2). No caso dos modelos SG_1 e SG_1_DLC, tanto as taxas de sucesso como as taxas de predição apresentam valores superiores aos valores de referência (> 0.90). Quanto ao modelo produzido com as variáveis menos importantes (SG_1_EPT), as taxas de sucesso e de predição apresentam valores de AAC inferiores ao valor de referência, 0.817 e 0.788, respectivamente.

Tabela 4.12 – Modelos de susceptibilidade produzidos a partir do subgrupo (SG_1) e AAC das respectivas taxas de sucesso e predição.

Modelo (Nº de Fontes)	Descrição	ÁREA ABAIXO DA CURVA (AAC)	
		Taxa de sucesso	Taxa de predição
SG_1 (40 FONTES)	Utilização de todas as variáveis. Taxa de sucesso calculada com as fontes utilizadas na criação do modelo (SG_1) e taxa de predição calculada com as fontes do subgrupo 2 (SG_2).	0.975	0.924
SG_1_DLC (40 FONTES)	Utilização das variáveis mais importantes (DECLIVE, LITOLOGIA OCUPAÇÃO DO SOLO). Taxa de sucesso calculada com as fontes utilizadas na criação do modelo (SG_1) e taxa de predição calculada com as fontes do subgrupo 2 (SG_2).	0.977	0.910
SG_1_EPT (40 FONTES)	Utilização das variáveis menos importantes (EXPOSIÇÃO, CURVATURA EM PERFIL, CURVATURA TRANSVERSAL). SG_1_EPT – Taxa de sucesso calculada com as fontes utilizadas na criação do modelo (SG_1) e taxa de predição calculada com as fontes do subgrupo 2 (SG_2).	0.817	0.788

A figura 4.14 sintetiza os resultados obtidos e, tal como no caso anterior, os mapas produzidos com a totalidade das variáveis e apenas com as três melhores (declive, litologia e ocupação do solo) são muito semelhantes. O modelo SG_1_EPT, identificado pela letra C, e produzido com as três variáveis menos importantes é definitivamente o que apresenta os piores resultados. Por comparação com os resultados equivalentes obtidos com a totalidade das fontes, nos modelos SG_1 (letra A) e SG_1_DLC (letra B) verifica-se um aumento dos tons esverdeados, ou seja, a área com susceptibilidade mais baixa parece incrementar.

As curvas de sucesso dos modelos SG_1 e SG_1_DLC apresentam um comportamento muito semelhante, sendo que a curva de sucesso do modelo SG_1_DLC (linha azul) apresenta um valor de AAC ligeiramente superior ao observado no modelo SG_1 (0.977 e 0.975, respectivamente). Contudo, em termos de curva de predição a situação inverte-se, uma vez que o modelo SG_1 tem um valor de AAC superior (0.924) à do modelo SG_1_DLC (0.910). O modelo SG_1_EPT apresenta valores de AAC para as curvas de sucesso e perda substancialmente inferiores às dos outros dois modelos, e mais uma vez abaixo do valor de referência, o que confirma a reduzida capacidade preditiva das 3 variáveis utilizadas.

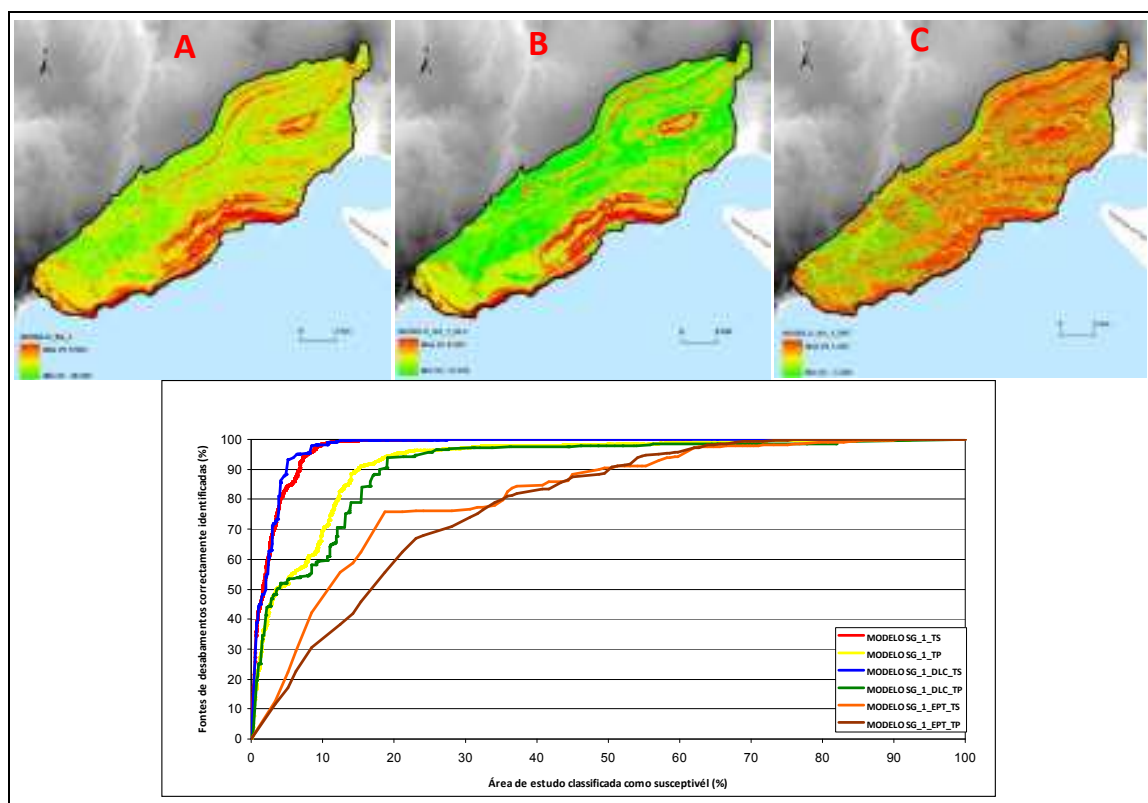


Figura 4.14 – Modelos de susceptibilidade à ocorrência de desabamentos e curvas de sucesso e de predição dos modelos SG_1 (A), SG_1_DLC (B) e SG_1_EPT (C).

5.1.3 – Modelos de susceptibilidade produzidos para o subgrupo de fontes (SG_2)

Na tabela 4.13 são apresentados os resultados obtidos com a utilização do segundo subgrupo de fontes de desabamentos (SG_2), para o qual foram produzidos três modelos de susceptibilidade: SG_2, SG_2_DEC e SG_2_LPT.

Os resultados demonstram uma elevada precisão dos modelos SG_2 e SG_2_DEC, com valores de AAC, tanto na taxa de sucesso como na taxa de predição, superiores ao valor de referência. O modelo produzido com as variáveis menos importantes (SG_2_LPT) não produz resultados com a qualidade desejada, nomeadamente em termos preditivos (AAC da taxa de predição de apenas 0.716).

Tabela 4.13 – Modelos de susceptibilidade produzidos a partir do subgrupo (SG_2) e AAC das respectivas taxas de sucesso e predição.

Modelo (Nº de Fontes)	Descrição	ÁREA ABAIXO DA CURVA (AAC)	
		Taxa de sucesso	Taxa de predição
SG_2 (40 FONTES)	Utilização de todas as variáveis. Taxa de sucesso calculada com as fontes utilizadas na criação do modelo (SG_2) e taxa de predição calculada com as fontes do subgrupo 1 (SG_2).	0.965	0.936
SG_2_DEC (40 FONTES)	Utilização das variáveis mais importantes (DECLIVE, EXPOSIÇÃO, OCUPAÇÃO DO SOLO). Taxa de sucesso calculada com as fontes utilizadas na criação do modelo (SG_2) e taxa de predição calculada com as fontes do subgrupo 2 (SG_1).	0.958	0.928
SG_2_LPT (40 FONTES)	Utilização das variáveis menos importantes (LITOLOGIA, CURVATURA EM PERFIL, CURVATURA TRANSVERSAL). Taxa de sucesso calculada com as fontes utilizadas na criação do modelo (SG_2) e taxa de predição calculada com as fontes do subgrupo 2 (SG_1).	0.827	0.716

A figura 4.15 confirma que o modelo SG_2_LPT (letra C) é o que apresenta o pior resultado. No seguimento do observado nos modelos SG_1 e SG_1_DLC, verifica-se que existe novamente um aumento das áreas com susceptibilidade mais baixa, com a diminuição do número de variáveis.

As curvas de sucesso e de predição dos modelos SG_2 (letra A) e SG_2_DEC (letra B) apresentam comportamentos muito semelhantes, sendo que os valores observados para o modelo SG_2 são ligeiramente superiores aos do modelo SG_2_DEC. As pequenas diferenças observadas permitem concluir que o desempenho do modelo preditivo baseado nos 3 melhores factores de predisposição à ocorrência de desabamentos é praticamente equivalente ao verificado com a totalidade dos factores. A reduzida importância dos factores de predisposição adicionais é confirmada pelos resultados medíocres do modelo preditivo que se sustenta nas 3 variáveis menos importantes.

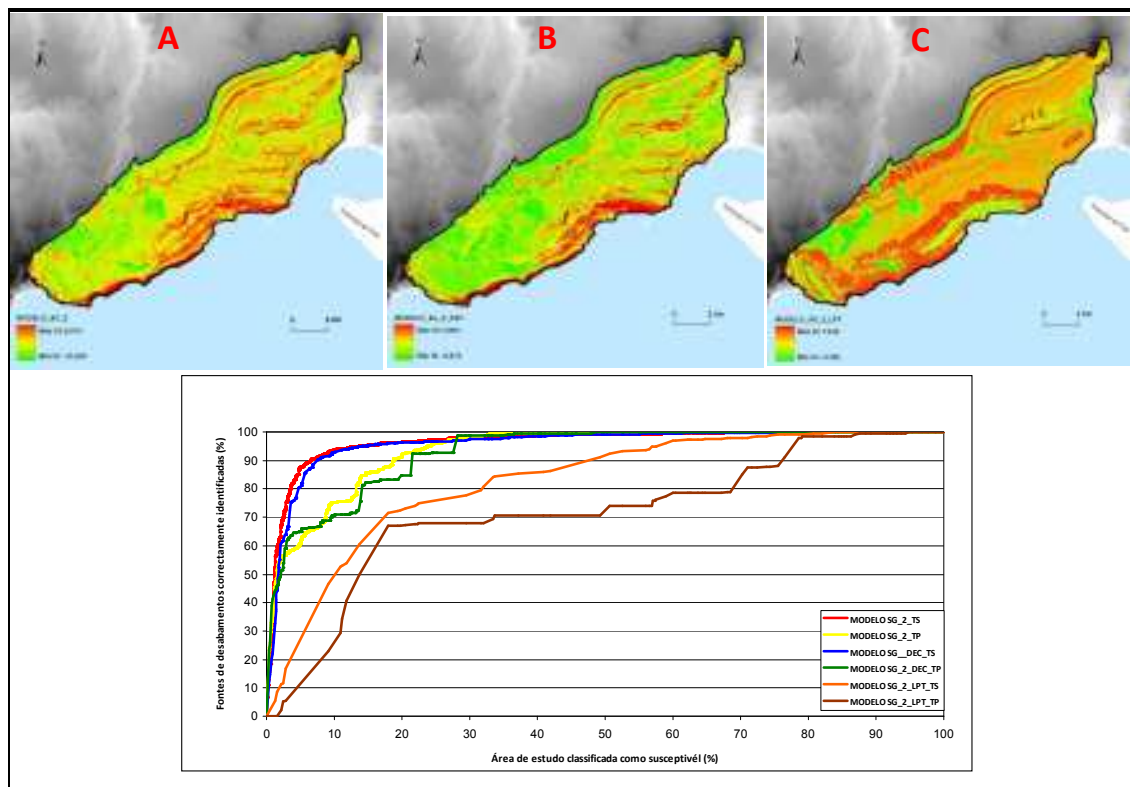


Figura 4.15 – Modelos de susceptibilidade à ocorrência de desabamentos e curvas de sucesso e de predição dos modelos SG_2 (A), SG_2_DEC (B) e SG_2_LPT (C).

5.2 – Determinação dos melhores modelos de susceptibilidade

Os critérios de escolha dos melhores modelos de susceptibilidade foram muito simples. Em primeiro lugar, pretendia-se utilizar um modelo para cada um dos grupos de fontes de desabamentos. Desta forma foi escolhido o modelo GTF, que corresponde à base dos restantes e que, tendo sido criado com todas as variáveis independentes, é aquele que, neste grupo, apresenta a taxa de sucesso com a AAC mais elevada. Com efeito, o valor da AAC (0.963) é ligeiramente superior ao resultado do modelo GTF_DCL, produzido com as três variáveis mais importantes (AAC = 0.961). Nos restantes grupos (SG_1 e SG_2) optou-se por escolher o modelo que apresenta-se melhores resultados, em termos médios, tendo para isso sido calculada a média dos valores de AAC das respectivas taxas de sucesso e predição. Os resultados encontram-se expressos na tabela 4.14.

Tabela 4.14 – Síntese das AAC dos modelos de susceptibilidade produzidos a partir do grupo total de fontes e dos subgrupos de fontes (SG_1 e SG_2).

Descrição	ÁREA ABAIXO DA CURVA (AAC)		Média AAC
	Taxa de sucesso	Taxa de predição	
GRUPO TOTAL DE FONTES (GTF)	0.963	-----	-----
GTF_DCL – Utilização das variáveis mais importantes, determinadas a partir da média dos índices Accountability e Reliability (DECLIVE, OCUPAÇÃO DO SOLO, LITOLOGIA)	0.961	-----	-----
1º SUBGRUPO DE FONTES (SG_1)	0.975	0.924	0.950
SG_1_DLC – Utilização das variáveis mais importantes, determinadas a partir da média dos índices Accountability e Reliability (DECLIVE, LITOLOGIA E OCUPAÇÃO DO SOLO)	0.977	0.910	0.944
2º SUBGRUPO DE FONTES (SG_2)	0.965	0.936	0.951
SG_2_DEC – Utilização das variáveis mais importantes, determinadas a partir da média dos índices Accountability e Reliability (DECLIVE, EXPOSIÇÃO E OCUPAÇÃO DO SOLO)	0.958	0.928	0.943

Em ambos os grupos SG_1 e SG_2, os valores médios das AAC mais elevados são obtidos nos modelos que utilizam todas as variáveis, pelo que estes são os modelos eleitos neste trabalho. Deste modo, a figura 4.16 ilustra os modelos de susceptibilidade à ocorrência de desabamento GTF, SG_1 e SG_2, seleccionados para classificação.

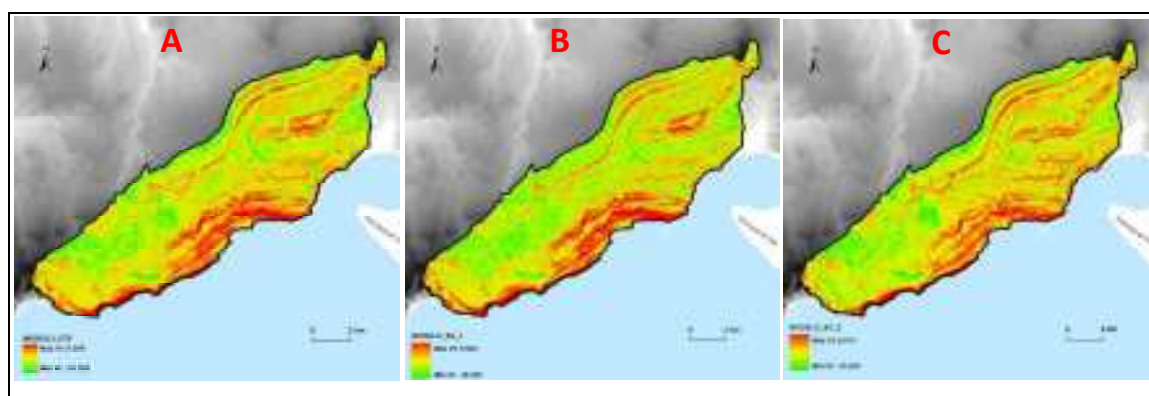


Figura 4.16 – Modelos de susceptibilidade à ocorrência de desabamentos seleccionados para classificação, GTF (A), SG_1 (B) e SG_2 (C).

5.3 – Classificação dos modelos de susceptibilidade

Os modelos produzidos devem ser submetidos a um processo de classificação, que corresponde a uma etapa extremamente importante na elaboração dos mapas de susceptibilidade (Garcia *et al.*, 2007).

Os modelos foram classificados em quatro classes de susceptibilidade, de forma quantitativa, a partir dos *scores* dos valores informativos finais observados em cada unidade matricial. A cada classe assim definida foi atribuída uma designação qualitativa da susceptibilidade.

Com base nos pressupostos do método, as unidades de terreno com VI negativo são unidades que, mantendo-se as condições actuais, terão menor predisposição para serem afectadas futuramente pelo fenómeno. Neste contexto, quanto maior for o valor negativo do VI mais reduzida será a susceptibilidade. Em contrapartida, valores de VI finais positivos indicam a existência de susceptibilidade ao fenómeno, tanto maior quanto mais elevado o score.

Deste modo, adoptou-se o valor de VI <-1 , como limite da classe de susceptibilidade *Reduzida ou nula*. Valores de VI compreendidos entre -1 e 0 constituem a classe de susceptibilidade *Moderada* e valores de VI entre 0 e 1 definem a classe de susceptibilidade *Elevada*. Para a classe de susceptibilidade *Muito elevada* ficam reservadas as unidades de terreno que apresentam valores de VI >1 . Nas figuras 4.17, 4.18 e 4.19 apresentam-se os resultados das classificações dos modelos seleccionados.

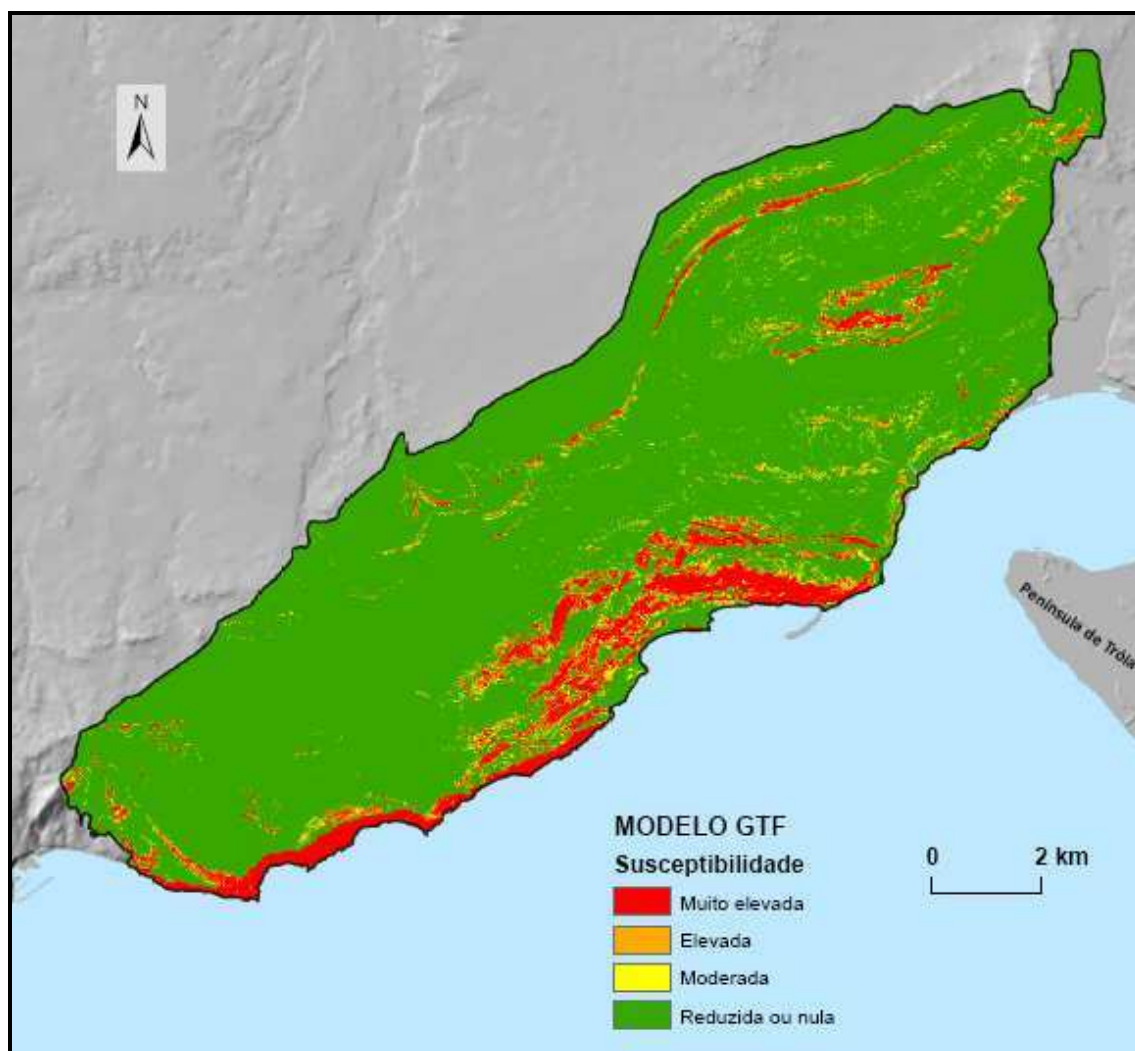


Figura 4.17 – Classificação qualitativa da susceptibilidade do modelo GTF.

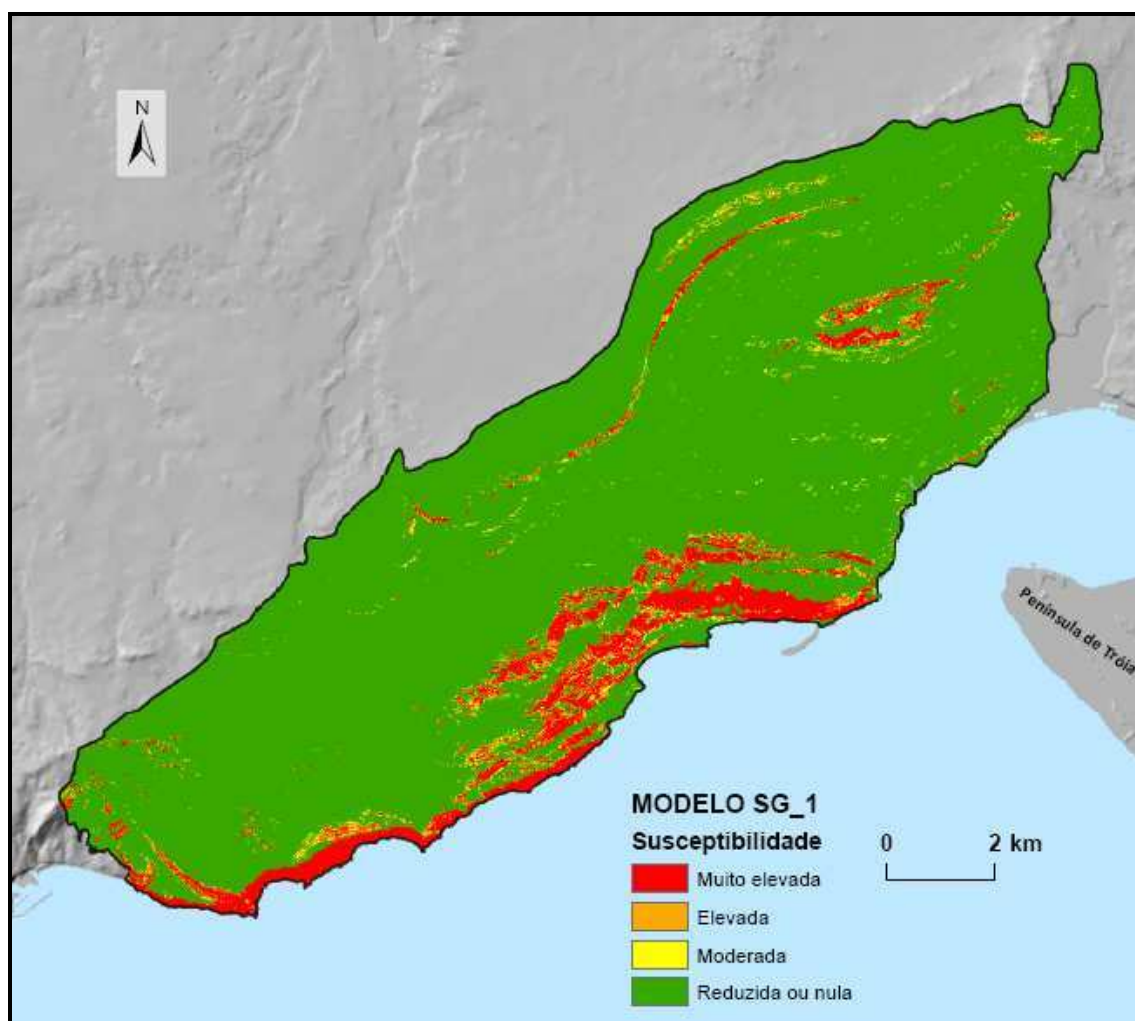


Figura 4.18 – Classificação qualitativa da susceptibilidade do modelo SG_1.

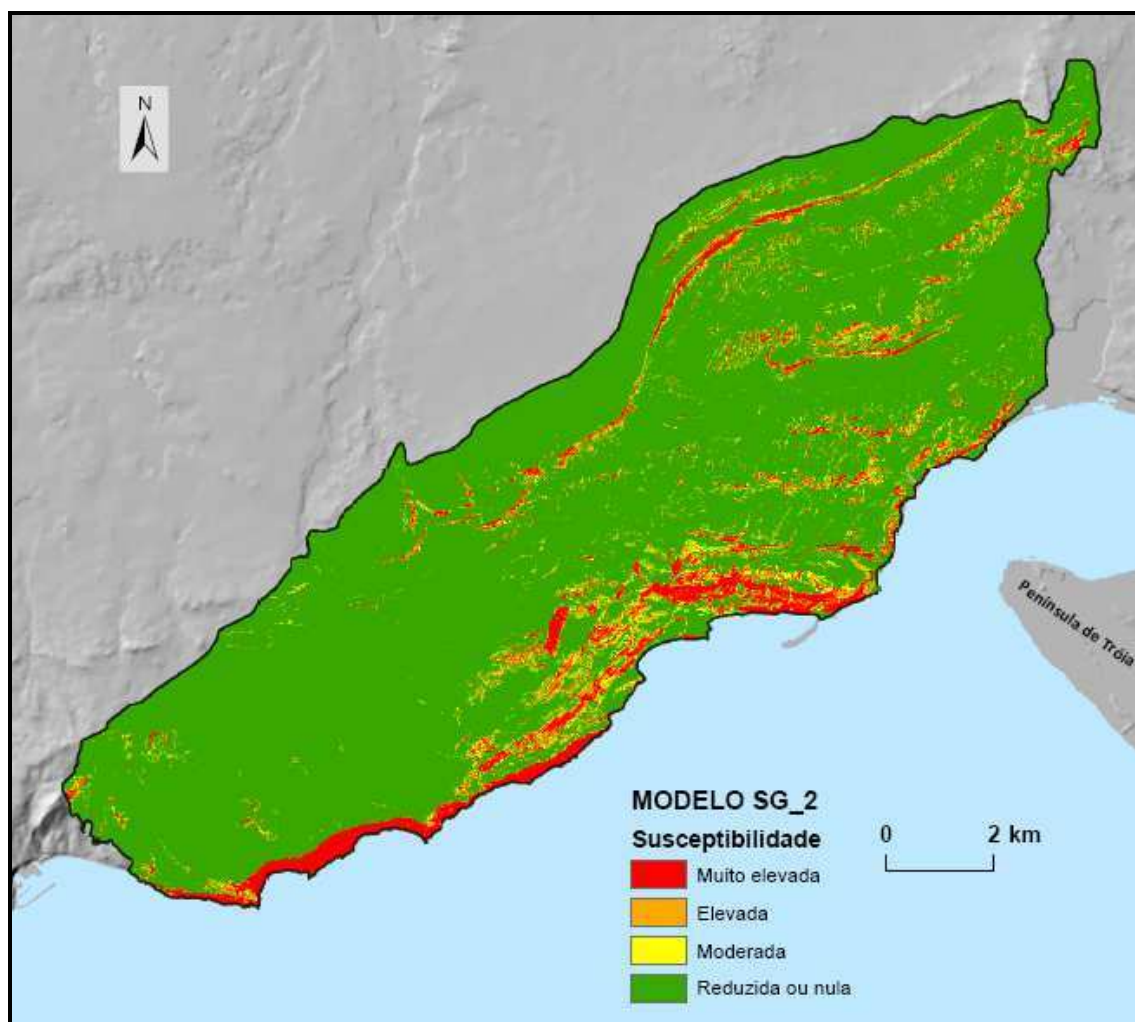


Figura 4.19 – Classificação qualitativa da susceptibilidade do modelo SG_2.

6 – Discussão de resultados

As diversas fases da modelação e validação da cartografia de susceptibilidade permitiram chegar à classificação de três modelos de susceptibilidade representativos da incidência espacial do perigo de desabamento na área de estudo. A escolha da totalidade das variáveis explicativas (seis) revelou-se a mais indicada, ainda que a utilização de um número reduzido de variáveis (três) possibilite a obtenção de resultados bastante satisfatórios.

Para além da determinação das AAC das taxas de sucesso e de predição dos modelos de susceptibilidade seleccionados (abordados na secção 5.2 deste capítulo), os resultados finais são também avaliados e validados através das fontes de desabamentos correctamente identificadas por percentagens de área de estudo classificada com susceptível, por ordem decrescente, em cada modelo. Van Den Eeckhaut *et al.* (2009) apontam, como valores de referência para graus de ajustamento elevados do modelo, taxa de sucesso ou de predição em que pelos 70% dos movimentos são validados em apenas 10% da área mais susceptível. Na tabela 4.15 podemos verificar que, à excepção da taxa de sucesso do modelo SG_1, com 69.5% das fontes de desabamentos validadas em 10% da área, todos os restantes apresentam valores superiores à atrás referida. Contudo, o modelo SG_1 destaca-se, uma vez que consegue validar a totalidade das fontes de desabamento em apenas 48.3% da área de estudo e apresenta um valor de AAC de 0.975. O modelo SG_2 é aquele que apresenta os melhores resultados em termos globais, uma vez que apresenta valores mais elevados de ajustamento para 10% de área, tanto nas fontes validadas com a taxa de sucesso (93.67%) como nas fontes validadas com a taxa de predição (75.21%), sendo estas validadas na totalidade em 83.28% e 77.27% da área total, respectivamente.

Tabela 4.15 – Relação entre fontes de desabamentos correctamente identificadas (%) e área de estudo classificada como susceptível por ordem decrescente (%) para as taxas de sucesso e predição dos modelos escolhidos.

Modelo de susceptibilidade	Fontes de desabamentos correctamente identificadas (%)	Área de estudo classificada como susceptível (%)						(% da área de estudo necessária para abranger 100% das fontes	Área Abaixo da Curva (AAC)	
		1	5	10	20	30	40			50
GTF – Taxa de sucesso		37.94	78.08	92.96	97.68	98.94	99.28	99.42	89.43	0.963
SG_1 – Taxa de sucesso		42.86	84.39	98.36	99.78	99.94	99.95	.....	48.32	0.975
SG_1 – Taxa de predição		23.04	51.69	69.50	94.71	97.25	97.91	98.36	96.48	0.924
SG_2 – Taxa de sucesso		41.97	87.51	93.67	96.64	97.99	98.66	98.99	83.28	0.965
SG_2 – Taxa de predição		38.44	60.89	75.21	92.39	97.70	99.71	99.92	77.27	0.936

Para Fell *et al.* (2008), o principal objectivo do zonamento da susceptibilidade consiste em incluir o maior número possível de movimentos na classe de susceptibilidade mais elevada, sendo o modelo tanto mais eficaz quanto menor for a área dessa classe.

No caso do modelo GTF (tabela 4.16), para o qual apenas foi possível determinar a taxa de sucesso, a classe de susceptibilidade *Muito elevada*, que corresponde a 7.59% da área total, consegue validar 87.50% das fontes de desabamentos. Por oposição, a classe de susceptibilidade *Reduzida ou nula* está representada em 86.31% da área total e valida apenas 3.78% das fontes de desabamentos. Os valores obtidos nas restantes classes reforçam a qualidade do modelo, concentrando nas primeiras duas classes 93.31% das fontes de desabamentos, validadas em apenas 10.33% da área total.

Tabela 4.16 – Representatividade das classes de susceptibilidade do modelo GTF na área de estudo e percentagem de movimentos validados pela taxa de sucesso.

Modelo de susceptibilidade	Classe de susceptibilidade	Scores	% Área	% Validados TS
GTF	Muito elevada	> 1	7.59	87.50
	Elevada	]0 - 1]	2.74	5.81
	Moderada	] -1 - 0]	3.36	2.91
	Reduzida ou nula	< -1	86.31	3.78
	Total		100	100

O desempenho dos modelos SG_1 e SG_2 foi avaliado com recurso à percentagem de fontes de desabamentos validadas através da taxa de sucesso e da taxa de predição. Como já foi referido, a validação pela taxa de predição fundamenta os resultados obtidos de uma forma mais robusta.

A tabela 4.17 sintetiza os resultados obtidos para o modelo SG_1. Os valores alcançados atestam o grau de ajuste do modelo, uma vez que este consegue validar, através da taxa de sucesso, 94.55% das fontes de desabamentos na classe de susceptibilidade *Muito elevada*, a qual representa apenas 7.48% da área total. No entanto, na validação através da taxa de predição o valor baixa para 57.90% e, para além disso, a classe de susceptibilidade *Reduzida ou nula* ainda contempla 24.67% da área instável, quando para a mesma classe a taxa de sucesso validava apenas 0.80% das fontes de desabamento. Estes resultados colocam em realce a importância da utilização da taxa de predição na validação dos modelos como um indicador do real grau de ajustamento do mesmo.

Tabela 4.17 – Representatividade das classes de susceptibilidade do modelo SG_1 na área de estudo e percentagem de movimentos validados pelas taxas de sucesso e predição.

Modelo de susceptibilidade	Classe de susceptibilidade	Scores	% Área	% Validados TS	% Validados TP
SG_1	Muito elevada	> 1	7.48	94.55	57.90
	Elevada	]0 - 1]	1.75	3.25	5.81
	Moderada	] -1 - 0]	2.07	1.40	11.62
	Reduzida ou nula	< -1	88.70	0.80	24.67
	Total		100	100	100

Os resultados obtidos para o modelo SG_2 (tabela 4.18) colocam este modelo em destaque, como o mais ajustado dos três escolhidos (GTF, SG_1 e SG_2). A comparação com o modelo GTF apenas é possível através das taxas de sucesso. Neste contexto, na classe de susceptibilidade *Muito elevada*, o valor obtido no modelo SG_2 é inferior em termo de área relativa (SG_2 = 6.11% e GTF = 7.59%) e superior em termos de percentagem de fontes validadas (SG_2 = 89.28% e GTF = 87.50%).

Tabela 4.18 – Representatividade das classes de susceptibilidade do modelo SG_2 na área de estudo e percentagem de movimentos validados pela taxa de sucesso e pela taxa de predição.

Modelo de susceptibilidade	Classe de susceptibilidade	Scores	% Área	% Validados TS	% Validados TP
SG_2	Muito elevada	> 1	6.11	89.28	64.81
	Elevada	]0 - 1]	2.67	3.11	6.32
	Moderada	] -1 - 0]	4.36	2.43	6.71
	Reduzida ou nula	< -1	86.86	5.18	22.16
Total			100	100	100

Quando comparado com o modelo SG_1, o melhor desempenho do modelo SG_2 é igualmente sensível. Apesar de na taxa e sucesso as fontes de desabamentos validadas na classe de susceptibilidade mais elevada do modelo SG_2 ser menor do que no modelo SG_1 (89.28% e 94.55%, respectivamente), a área abrangida por esta classe de susceptibilidade no modelo SG_2 é mais reduzida por comparação com o modelo SG_1 (6.11% e 7.48%, respectivamente). No entanto, a diferença mais importante reside nos valores observados no caso das taxas de predição. Com efeito, a percentagem de fontes validadas através da taxa de predição do modelo SG_2, para a mesma classe de susceptibilidade supera em 6.91% os valores equivalentes do modelo SG_1. As restantes classes de susceptibilidade do modelo SG_2 apresentam uma distribuição relativa em termos de percentagem de área pelas classes que acompanha a tendência dos restantes modelos, sendo que o valor da classe de susceptibilidade *Reduzida ou nula*, se aproxima da do modelo GTF (86.31%) e é ligeiramente inferior à do modelo SG_1 (88.70%).

Deste modo, o modelo de susceptibilidade à ocorrência de desabamentos SG_2 é seleccionado para a prossecução do objectivo seguinte desta dissertação, sendo utilizado para seleccionar áreas de teste localizadas nas áreas classificadas com o nível de susceptibilidade *Muito elevada*, para proceder à modelação da propagação dos desabamentos.

CAPÍTULO 5 – MODELAÇÃO, VALIDAÇÃO E ANÁLISE DA CARTOGRAFIA DE SUSCEPTIBILIDADE À PROPAGAÇÃO DE DESABAMENTOS

1 – Modelação da susceptibilidade à propagação de desapamentos

A modelação da susceptibilidade à ocorrência de desapamentos permite determinar a probabilidade espacial de ocorrência de instabilidade numa determinada área. Posteriormente, os impactos das eventuais ocorrências são avaliados com recurso à modelação das propagações dos desapamentos. Através da utilização de programas de modelação de propagações em 2D ou 3D são determinadas as áreas de propagação, são estudadas as trajectórias e calculadas as velocidades e a energia associada aos desapamentos. Na presente dissertação, a modelação apenas foi desenvolvida com vista a determinar as áreas de propagação. Para Jaboyedoff e Labiouse (2011) a modelação da propagação associa-se ao cálculo da probabilidade de ocorrência, que por sua vez resulta da probabilidade de mobilização e da probabilidade de alcance, isto é, a probabilidade de um bloco ou de uma massa, depois de desagregado, atingir um determinado ponto na topografia. O cálculo anterior destas probabilidades deve basear-se na observação directa, tanto na determinação dos pontos de partida de blocos (fontes), como nas áreas de deposição de blocos ou o ponto de chegada. Contudo, Jaboyedoff *et al.* (1999) alertam para as limitações ou dificuldades que se impõem à observação directa, que decorrem das dificuldades de acesso a áreas de propriedade privada, bem como a áreas cujo alcance ponha em risco a integridade física do observador.

Agliardi e Crosta (2003) consideram que a modelação de desapamentos pretende avaliar as áreas de propagação e as distâncias máximas percorridas, podendo para tal ser utilizados: (i) modelos empíricos que assentam nas relações entre a topografia e outros factores condicionantes; (ii) modelos cinemáticos que consideram o movimento e a velocidade dos desapamentos; (iii) modelos dinâmicos que consideram o movimento e a energia associada aos desapamentos. Crosta e Agliardi (2003) consideram que a modelação de desapamentos pretende definir para cada bloco: (i) o percurso de queda (ii) a distancia máxima atingida (iii) as possíveis áreas afectadas,

durante as trajectórias; e (iv) a distribuição da velocidade e energia ao longo das trajectórias, o que permite definir a perigosidade do processo (Agliardi e Crosta, 2003). Para Jaboyedoff *et al.* (1999) e Jaboyedoff e Labiouse (2011), a análise detalhada do MNE é considerada crucial em qualquer estudo relacionado com a instabilidade de vertentes. A exploração do MNE, juntamente com a análise da instabilidade passada e das propriedades geomecânicas dos materiais, permite determinar, de forma empírica, os limiares de declive críticos para o desabamento.

De acordo com Loye (2008), a falta de conhecimento efectivo, das fontes de desabamentos e das trajectórias seguidas pode ser colmatada com a criação de um inventário de fontes, de depósitos e de blocos. Ainda assim, segundo o mesmo autor, a atribuição das fontes a partir dos depósitos e dos blocos pode ser uma tarefa difícil de realizar, nomeadamente em vertentes onde as evidências são menos claras. Abbruzzese *et al.* (2009) apontam como fonte de incerteza adicional o tipo de informação cartográfica e/ou histórica que nem sempre está disponível.

Para tentar suprimir algumas das dificuldades foram desenvolvidos programas de modelação de desabamentos em 2D e 3D que simplificam os processos, com vantagens e inconvenientes. Segundo Guzzetti *et al.* (2002) os programas 2D que funcionam ao longo de perfis pré-definidos não levam em linha de conta o efeito 3D da topografia nas trajectórias e, em particular, na dispersão lateral, situação também verificada por Agliardi e Crosta (2003). Contudo, os programas 2D apresentam vantagens ao nível operacional e computacional (Agliardi e Crosta, 2003).

Na presente dissertação optou-se pela utilização de um programa 3D, designado *CONEFALL 1.0*, cujos pressupostos e princípios de funcionamento são apresentados na secção seguinte.

2 – O método *CONEFALL*

Jaboyedoff (2003) propõe a utilização do método *CONEFALL*, que deu origem a um programa com a mesma designação: *CONEFALL 1.0* (Jaboyedoff e Labiouse, 2003). Na realidade, trata-se de um programa bastante simples do ponto de vista operacional, que produz resultados de forma expedita. Contudo, é necessário ter em conta os

pressupostos apresentados pelos autores do método. Desde logo, Jaboyedoff e Labiouse (2003) entendem que é muito difícil determinar a trajectória exacta de um bloco ao longo de uma vertente, e que a perigosidade dos desabamentos reside na distância máxima que os blocos podem atingir (*run-out*) nas suas trajectórias, incluindo a dispersão lateral. Adicionalmente, Jaboyedoff (2003) considera que a determinação exacta das áreas potencialmente ameaçadas por desabamentos representa ainda um grande desafio, e entende que para o cálculo da distância máxima que os blocos podem percorrer é necessário efectuar uma calibração baseada na observação directa, cuja fiabilidade depende da quantidade e da frequência de desabamentos, bem como do número de fontes utilizadas. Neste contexto, um maior número de fontes potenciais e um maior número de desabamentos deverão produzir melhores resultados e maior fiabilidade nas simulações.

O método *CONEFALL* baseia-se no princípio de Heim, desenvolvido em 1932, que por sua vez utilizava o método do ângulo da linha de energia (o ângulo ϕp), que corresponde ao ângulo entre o plano horizontal e a linha recta traçada do topo da vertente ao ponto de paragem do bloco mais afastado. O método foi, posteriormente, adaptado para simular o desabamento de blocos isolados e assume-se como uma boa aproximação ao comportamento de blocos isolados, mas que dificilmente se aplica a avalanches. Com efeito, um bloco tenderá a diminuir o seu movimento e a parar a deslocação com a diminuição do declive, o que não ocorre obrigatoriamente no caso das avalanches, uma vez que o movimento pode ser prolongado devido à pressão da restante massa deslocada.

O método *CONEFALL* aproxima-se do proposto por Evans e Hungr (1993) "*Minimum shadow angle*", que corresponde ao ângulo entre o plano horizontal e a linha recta traçada desde a fonte do desabamento ao ponto de paragem do bloco mais afastado, sendo neste caso o topo da vertente substituído pela fonte.

Jaboyedoff (2003) assume que a perda de energia ao longo da vertente é linear, no entanto considera que a trajectória depende de diferentes mecanismos. O método sobrestima a dispersão lateral, uma vez que a abertura do cone é frequentemente maior que o observado, sendo por isso considerado um método conservador.

Através da utilização das células de origem (fontes), é proposto que um bloco desagregado e movendo-se ao longo de uma vertente com declive superior ao limiar de declive crítico, tenderá a manter uma velocidade constante. Por conseguinte, um bloco necessita de declives inferiores ao limiar definido, para que possa ver diminuída a sua velocidade até que possa parar. Desta forma, o ponto de partida de um bloco deve ter um declive superior ao limite para que se inicie o movimento. Jaboyedoff e Labiouse (2003) apontam os declives de 27° a 35° como limiares, definidos a partir de um caso de instabilidade na Suíça.

O Programa *CONEFALL 1.0* estima o potencial de propagação de desapamentos a partir de dois ficheiros matriciais, o modelo numérico de elevação (MNE) e as fontes de desapamentos inventariadas. Desta forma, o programa verifica quais as células localizadas abaixo da linha de energia, e considera que um bloco pode propagar-se da sua fonte até o ponto de intersecção da topografia com a linha de energia, definida segundo o ângulo ϕ_p . A dispersão lateral é definida pela intersecção do cone com a topografia, podendo ser limitada com um ângulo azimutal de tolerância. A área de propagação é definida pelas células onde o declive é superior ao ângulo da linha de energia localizada dentro de um cone centrado nas fontes, sendo o procedimento aplicado a todas as anteriores. Como opções, o programa permite usar todas as fontes de desapamentos ou apenas o limite superior das células fonte, e inclui todas as células abaixo, o que teoricamente define áreas de propagação idênticas. No entanto, traduz-se numa redução do tempo de computação. As áreas de propagação são identificadas com o valor 1, quando a célula se encontra dentro de pelo menos um cone, ou -1 quando a célula está localizada fora da área de propagação. Para além disso, o programa calcula o número de fontes que contribuem para a mesma célula, indicando assim, através do valor obtido em cada célula, quais as áreas que podem ser afectadas pelo maior número de blocos. Neste contexto, os autores recomendam a utilização de todas as células para se obter uma contagem representativa de toda a área.

Jaboyedoff e Labiouse (2003) entendem que, à escala regional, o *CONEFALL* é uma boa ferramenta para estimar as áreas mais susceptíveis à propagação de desapamentos, usando apenas uma opção binária (sim (1) e não (-1)), o que determina

se as células podem ou não ser afectadas. Como opção, o programa pode proceder à contagem do número de fontes que contribuem para a mesma célula, determinando assim a densidade de trajectórias em cada célula. O programa permite ainda definir um mapa de velocidades e de energia, médias e máximas, para cada célula na área de propagação, mas os autores alertam para o facto de que variáveis contínuas, como a velocidade e energia, devem apenas ser utilizadas com uma análise criteriosa da morfologia e testando diferentes possibilidades de ângulos de linha de energia a partir das fontes. Desta forma, as velocidades e a energia saem fora do âmbito da análise da susceptibilidade, mas entende-se que podem ser muito úteis para calcular a perigosidade e o risco.

3 – Metodologia utilizada para a modelação das propagações de desapamentos

Para desenvolver os procedimentos metodológicos inerentes ao programa *CONEFALL 1.0*, foi necessário recorrer a diferentes programas, nomeadamente para efectuar a transformação de ficheiros. Uma vez que os ficheiros de base utilizados (MNE e fontes de desapamentos) foram produzidos no programa *ArcGis 9.3*, foi necessário proceder à sua transformação para ficheiros de texto (extensão *.ASCII*), de forma a poderem ser lidos no *CONEFALL 1.0*. Nesta fase recorreu-se ao programa *ArcView 3.3* para executar a transformação dos ficheiros MNE e Fontes de desapamentos, para cada área teste, para a extensão (*.ASCII*), através do comando “*Export Data Source*”. Com o anterior procedimento, os ficheiros passaram a estar disponíveis para leitura no *CONEFALL 1.0*. Contudo, e uma vez que este funciona com uma extensão própria (*.GRD*) que possibilita a sua leitura no programa *Surfer 8*, foi necessário transformar os referidos ficheiros no programa *CONEFALL 1.0*, através do comando “*Change Format File*” para a extensão (*.GRD*). Os ficheiros de *output*, resultantes das simulações na extensão (*.GRD*), foram transformados, ainda no *CONEFALL 1.0* e através do mesmo comando “*Change Format File*”, mas neste caso para a extensão (*.ASC*), o que possibilita a sua leitura no programa *ArcGis 9.3*.

No menu do programa *CONEFALL 1.0* (fig. 5.1), são definidos os parâmetros básicos de funcionamento do mesmo. Neste menu são seleccionados, o MNE (Digital elevation model file) e as fontes de desapamentos (Source point file) e é atribuída a designação

ao ficheiro com os resultados (Output file). No lado inferior direito da figura 5.1 são definidos os tipos de Output que podem ser gerados e que contêm diferentes informações. O lado inferior esquerdo da figura 5.1 reporta as especificações geométricas do cone usado para estimar a área de propagação, sendo as mesmas apresentadas de forma esquemática na figura 5.2.

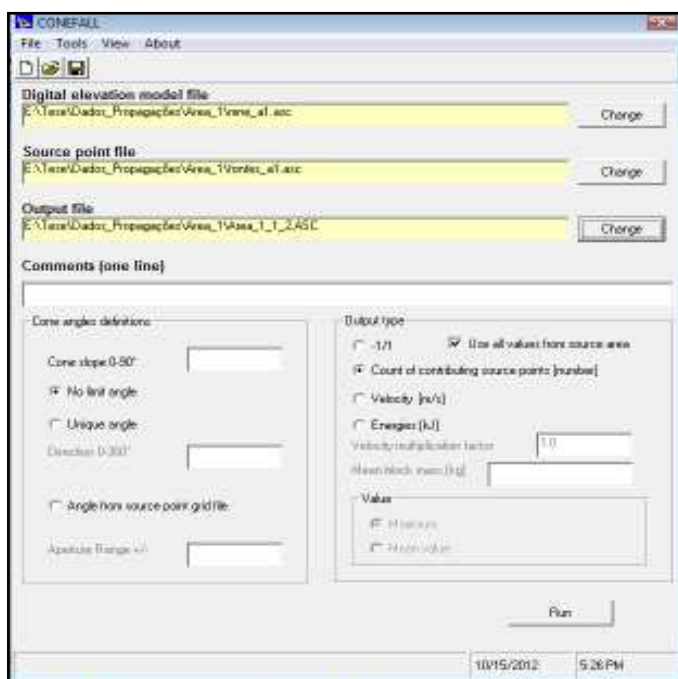


Figura 5.1 – Menu e opções do CONEFALL 1.0 (Jaboyedoff, 2003).

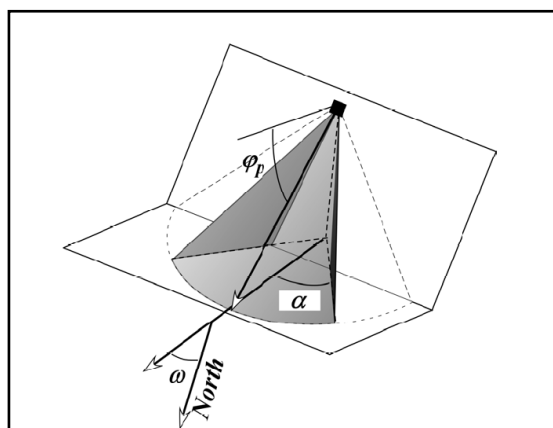


Figura 5.2 – Especificações geométricas do cone (Jaboyedoff, 2003).

O programa permite definir o ângulo do cone ou o ângulo de alcance (ϕ_p - Cone slope 0-90°), a tolerância azimutal do cone (ω - Direction 0-360°) e o ângulo de abertura do cone (α - Angle from source point grid file).

Na presente dissertação optou-se por não limitar nem a direcção (ω) da propagação nem o ângulo de abertura do cone (α), tendo-se apenas feito variar o ângulo de alcance (ϕ_p). Desta forma, o programa faz a verificação da vertente em todos os sentidos a partir das fontes. Quanto aos resultados (outputs), foram considerados todos os valores a partir das fontes (*Use all values from source area*), bem como o número de fontes que contribuem para uma mesma célula (*Count contributing source points*), com vista à obtenção das densidades de trajectórias que se realizam em cada célula, determinado assim o grau de susceptibilidade de propagação de desabamentos.

Após terem sido executados todos os procedimentos metodológicos foram feitas diversas simulações com o programa *CONEFALL 1.0*, nas diferentes áreas e com diferentes ângulos de alcance, o que Corominas (1996) define como “*Angle of Reach*”. Em cada uma das quatro áreas de teste foram efectuadas sete simulações com variação do ângulo de alcance de 0.5°. A determinação dos ângulos necessários para efectuar a modelação das propagações foi feita por tentativa e erro, isto é, foram feitas simulações com ângulos que variavam entre 16° e 20° e, posteriormente, foram sendo detectados quais os ângulos que apresentavam os melhores resultados e que funcionariam como ângulo mínimo e máximo para a área em questão.

Os resultados produzidos pelo *CONEFALL 1.0* reflectem a densidade de trajectórias que ocorrem em cada célula, pelo que ocorrem valores diferentes para cada uma das áreas e para cada uma das simulações, na mesma área. Posteriormente, estes resultados foram classificados em 4 classes de susceptibilidade, (Muito elevada; Elevada; Moderada; Reduzida ou nula), à semelhança das classes utilizadas na modelação da susceptibilidade à ocorrência de desabamentos, se bem que neste caso a divisão em classe tenha sido feita com base nos *Quartis*. O uso de um processo de classificação de dados baseado na frequência de ocorrências permite comparar os diferentes resultados obtidos, independentemente da gama de valores observada em cada uma das simulações.

Os resultados da classificação foram posteriormente reclassificados através do comando “Reclassify” do *ArGis 9.3*, passando assim a apresentar um número de ordem sem qualquer hierarquia. Em seguida, e através da tabulação, foram cruzadas as classes de susceptibilidade com a distribuição espacial dos depósitos de desabamento e dos blocos desabados isolados presentes em quatro áreas teste seleccionadas. Das tabelas resultantes foram exportadas para uma folha de cálculo e foram criadas quatro novas colunas:

- 1 - (Pix_Dep) para obter o número de células das áreas de depósito de desabamento em cada uma das classes de susceptibilidade;
- 2 - (Pix_Bloc) para obter o número de células das áreas de blocos desabados isolados em cada uma das classes de susceptibilidade;

- 3 - (Percent_Dep) para calcular a distribuição relativa das áreas de depósito de desabamento em cada uma das classes de susceptibilidade;
- 4 - (Percent_Bloc) para calcular a distribuição relativa das áreas de blocos desabados isolados em cada uma das classes de susceptibilidade.

3.1 - Definição de áreas de teste

As quatro áreas de teste foram seleccionadas na Arrábida tendo em conta a susceptibilidade à rotura determinada no capítulo 4 e, principalmente, a existência de materiais desabados identificados no trabalho de campo, sob a forma de depósitos de desabamento ou de blocos desabados isolados. Apesar de terem sido feitas algumas tentativas de modelar outras áreas, os resultados obtidos não se apresentavam como utilizáveis e, noutros casos, o programa simplesmente não produzia resultados. Esta situação não pode ser inteiramente esclarecida, mas pontualmente foi verificado que em áreas que apresentavam fontes de desabamentos sucessivas, na mesma vertente, o programa produzia uma mensagem de erro.

Numa primeira fase, as áreas teste foram delimitadas em sistema vectorial (*ArgGis* 9.3), de forma a abranger todos os depósitos e/ou blocos desabados, com origem provável nas fontes consideradas. Posteriormente, procedeu-se à transformação matricial das mesmas para células de 5x5m, de acordo com a resolução que havia sido utilizada anteriormente. Uma vez que o MNE e as fontes de desabamentos utilizados nesta fase foram exactamente os mesmos utilizados na modelação da susceptibilidade à ocorrência de desabamentos, e uma vez que já se apresentava na resolução pretendida, apenas se procedeu ao corte pelas áreas definidas.

A tabela 5.1 sintetiza a superfície abrangida pelas quatro áreas teste de modelação das propagações, cuja distribuição espacial pode ser verificada na figura 5.3, onde foram sobrepostas ao modelo de susceptibilidade à ocorrência de desabamentos escolhido no capítulo 4 (SG_2).

Tabela 5.1 – Dimensão das áreas teste (m²).

Área Teste	Área (m ²)
Área 1	234.225
Área 2	1.033.100
Área 3	896.200
Área 4	471.825
Total	2.635.350

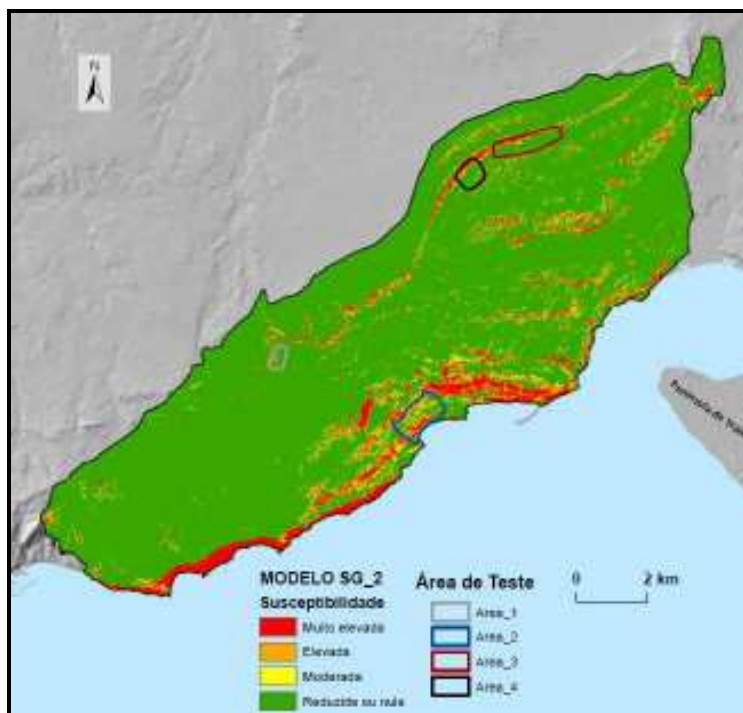


Figura 5.3 – Distribuição espacial das áreas teste na área de estudo.

Jaboyedoff e Labiouse (2003) entendem que as áreas que devem beneficiar de prioridade de investigação serão aquelas que onde são encontrados os limiares de declive estabelecidos, apontando, como já foi referido, para valores entre 27° e 35°. Contudo, estes valores foram definidos num contexto específico, pelo que necessitam de calibração para a área de estudo. Após ultrapassada esta tarefa importa definir, na área de estudo, as áreas com declives mais elevados e a partir destas efectuar as simulações das áreas de propagação. Na tabela 5.2 são apresentadas as áreas obtidas através da individualização de diferentes limiares de declive para a área da Arrábida.

O limiar de declive mais baixo (> 25°) foi definido tendo em conta o valor obtido na tabulação das classes de declive e o inventário de fontes, que demonstrou que os valores de VI positivos ocorrem sistematicamente acima do declive de 25°. A área ocupada pelas vertentes com declive >25° é de 13.92 km², o que corresponde a 11.85% da área total.

A distribuição espacial das vertentes com declive superior a 25° pode ser verificada na figura 5.4, onde foram sobrepostas as quatro áreas de teste para propagação de deslizamentos.

Tabela 5.2 – Distribuição absoluta e relativa da área de estudo por limiar de declive.

Limiar de declive	Nº de células	Área (m ²)	Área (km ²)	Área (%)
> 25°	556771	13919275	13.92	11.85
> 30°	297196	7429900	7.43	6.33
> 35°	158438	3960950	3.96	3.37
> 40°	87404	2185100	2.19	1.86
> 45°	50946	1273650	1.27	1.08
Área total	4698486	117462150	117.46	100.00

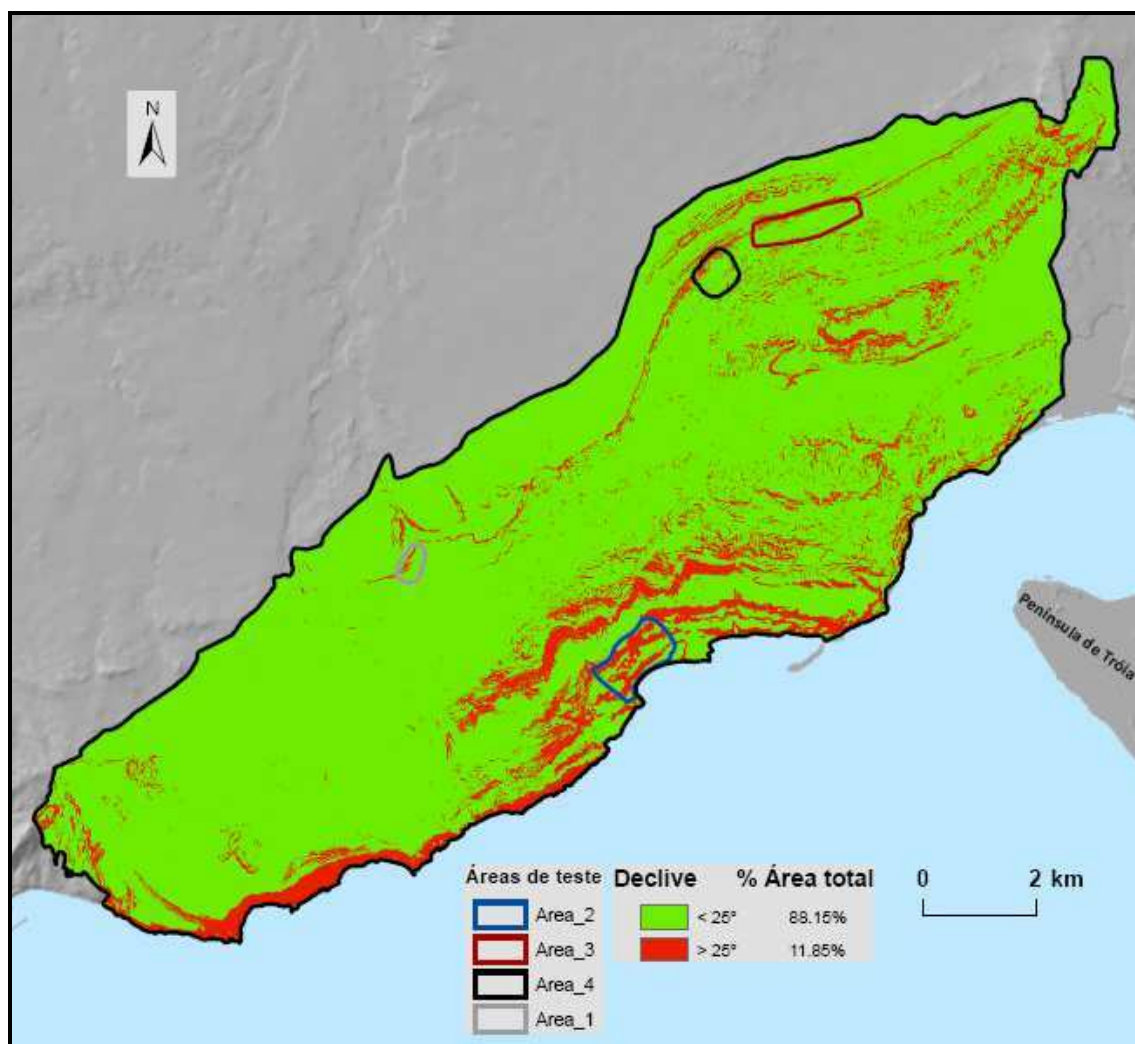


Figura 5.4 – Distribuição espacial das vertentes com declive superior a 25° e localização das áreas de teste.

3.2 – Variáveis de Entrada

As variáveis de entrada necessárias correspondem a dois ficheiros, o MNE que reproduz a morfologia da área e o inventário de fontes de desabamentos que determina o ponto, quando assinalado apenas por uma célula, ou a área de partida dos desabamentos. Os dois temas devem, obrigatoriamente, apresentar-se em matriz de células quadradas e apresentarem a mesma área em termos de limites, para garantir o correcto funcionamento do programa *CONEFALL 1.0*.

4 – Resultados e discussão

A interpretação dos resultados foi feita de forma independente para cada uma das áreas teste e para cada uma das variações de ângulo de alcance, avaliando a relação entre as classes de susceptibilidade e a distribuição das áreas de depósitos e ou das áreas de blocos, nessas mesmas classes. Foram estabelecidos os seguintes critérios para avaliar e comparar os resultados: (i) a maior percentagem de área de depósito e/ou de blocos na classe de susceptibilidade muito elevada; (ii) a menor percentagem de área de depósito e/ou de blocos na classe de susceptibilidade reduzida ou nula; (iii) o resultado da soma dos valores percentuais obtidos nas duas primeiras classes de susceptibilidade (Muito elevada e Elevada).

4.1 – Área de teste 1

A área de teste 1 localiza-se junto à aldeia da Piedade, na Vila de Azeitão, no concelho de Setúbal. A zona de rotura é caracterizada pelo afloramento de arenitos bastante consolidados do Cretácico. Para a área de teste 1 foram considerados um ângulo de alcance mínimo de 12.5° e máximo de 15.5°, com variações de 0.5°, o que deu origem a sete modelos de propagação. Importa referir que para esta área o programa *CONEFALL 1.0* não consegue simular áreas de propagação com ângulos de alcance superiores a 15.5°. Na figura 5.5 são apresentados os resultados da distribuição das áreas de propagação associadas aos ângulos de alcance simulados, sendo evidente que ângulos de alcance mais baixos produzem maiores áreas de propagação.

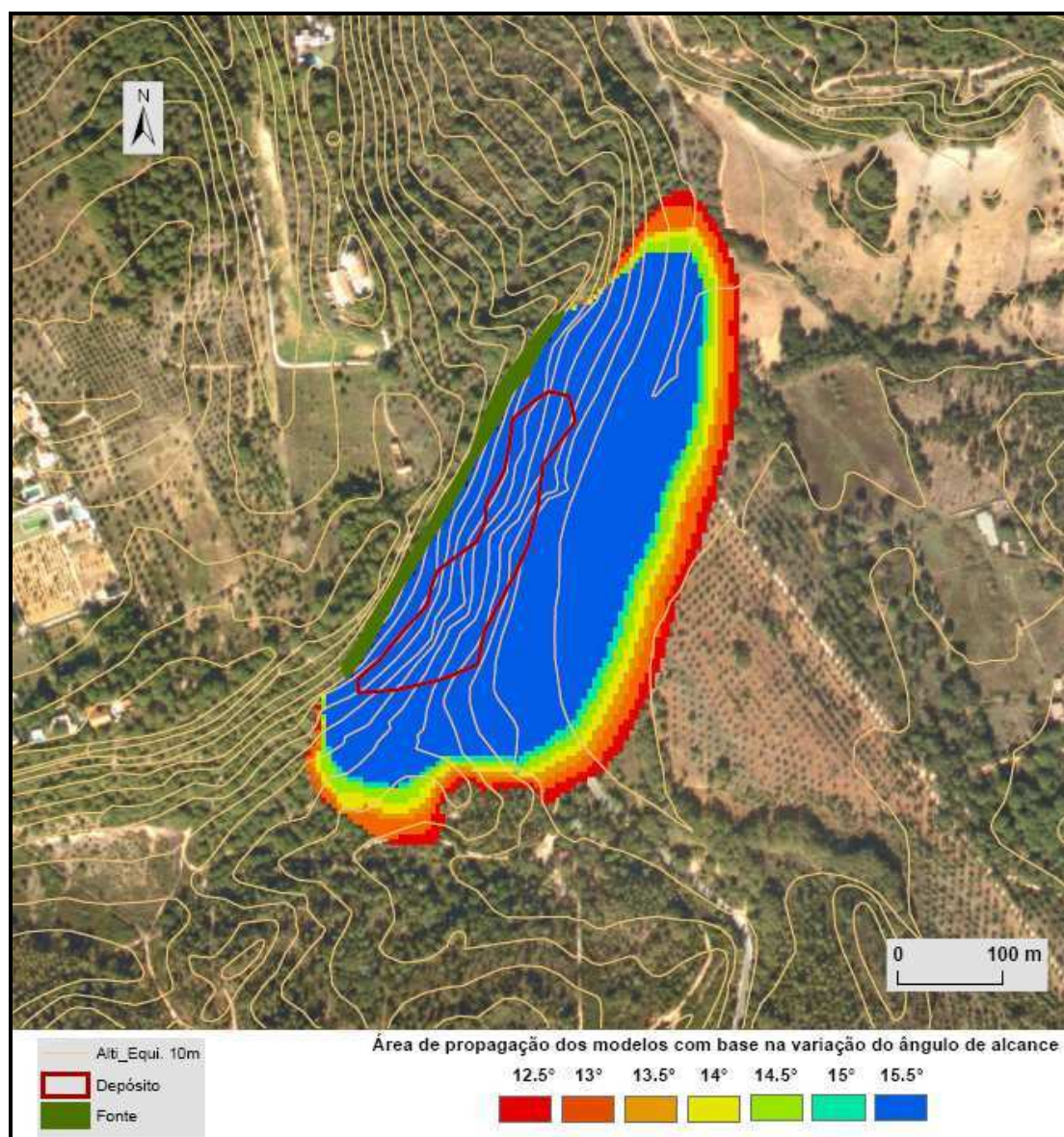


Figura 5.5 – Modelos de propagação de deslizamentos associados a ângulos de alcance entre 12.5° e 15.5° na área teste 1.

Na tabela 5.3 são apresentados os elementos de síntese dos sete modelos de propagação efectuados para a área teste 1, bem como os resultados da validação dos depósitos de deslizamento que existem na área. Como seria de esperar, a área máxima de propagação corresponde ao ângulo de alcance mais baixo (12.5°), atingindo 136.550m².

Tabela 5.3 – Distribuição absoluta e relativa das classes de susceptibilidade e resultados da tabulação com as áreas de depósito por ângulo de alcance, na área teste1.

Área 1 - Ângulo de alcance 12.5°							
Classe de susceptibilidade	Área			Tabulação depósitos (17.100 m² = 684 células)			
	m²	nº células	% área total	m²	nº células	% depósitos	% acum
Muito elevada	34100	1364	24.97	3925	157	22.95	22.95
Elevada	31350	1254	22.96	6975	279	40.79	63.74
Moderada	36500	1460	26.73	5700	228	33.33	97.08
Reduzida ou nula	34600	1384	25.34	500	20	2.92	100.00
Total	136550	5462	100.00	17100	684	100.00	

Área 1- Ângulo de alcance 13°							
Classe de susceptibilidade	Área			Tabulação depósitos (17.100 m² = 684 células)			
	m²	nº células	% área total	m²	nº células	% depósitos	% acum
Muito elevada	32625	1305	25.35	3725	149	21.78	21.78
Elevada	30950	1238	24.05	7450	298	43.57	65.35
Moderada	33400	1336	25.95	5625	225	32.89	98.25
Reduzida ou nula	31725	1269	24.65	300	12	1.75	100.00
Total	128700	5148	100.00	17100	684	100.00	

Área 1 (234.225 m² = 9369 células) Ângulo de alcance 13.5°							
Classe de susceptibilidade	Área			Tabulação depósitos (17.100 m² = 684 células)			
	m²	nº células	% área total	m²	nº células	% depósitos	% acum
Muito elevada	30550	1222	25.92	3325	133	19.44	19.44
Elevada	30025	1201	25.47	7825	313	45.76	65.20
Moderada	29275	1171	24.84	5450	218	31.87	97.08
Reduzida ou nula	28025	1121	23.77	500	20	2.92	100.00
Total	117875	4715	100.00	17100	684	100.00	

Área 1 - Ângulo de alcance 14°							
Classe de susceptibilidade	Área			Tabulação depósitos (17.100 m² = 684 células)			
	m²	nº células	% área total	m²	nº células	% depósitos	% acum
Muito elevada	28575	1143	25.19	3025	121	17.69	17.69
Elevada	29175	1167	25.72	8175	327	47.81	65.50
Moderada	27825	1113	24.53	5475	219	32.02	97.51
Reduzida ou nula	27875	1115	24.56	425	17	2.49	100.00
Total	113450	4538	100.00	17100	684	100.00	

Área 1 - Ângulo de alcance 14.5°							
Classe de susceptibilidade	Área			Tabulação depósitos (17.100 m² = 684 células)			
	m²	nº células	% área total	m²	nº células	% depósitos	% acum
Muito elevada	26075	1043	24.35	2750	110	16.08	16.08
Elevada	27325	1093	25.51	8275	331	48.39	64.47
Moderada	27225	1089	25.42	5650	226	33.04	97.51
Reduzida ou nula	26475	1059	24.72	425	17	2.49	100.00
Total	107100	4284	100.00	17100	684	100.00	

Área 1 - Ângulo de alcance 15°							
Classe de susceptibilidade	Área			Tabulação depósitos (17.100 m² = 684 células)			
	m²	nº células	% área total	m²	nº células	% depósitos	% acum
Muito elevada	24750	990	25.05	2650	106	15.50	15.50
Elevada	25950	1038	26.27	8400	336	49.12	64.62
Moderada	24450	978	24.75	5400	216	31.58	96.20
Reduzida ou nula	23650	946	23.93	650	26	3.80	100.00
Total	98800	3952	100.00	17100	684	100.00	

Área 1 (234.225 m² = 9369 células) Ângulo de alcance 15.5°							
Classe de susceptibilidade	Área			Tabulação depósitos (17.100 m² = 684 células)			
	m²	nº células	% área total	m²	nº células	% depósitos	% acum
Muito elevada	23875	955	24.95	2900	116	16.96	16.96
Elevada	24225	969	25.31	8150	326	47.66	64.62
Moderada	24275	971	25.37	5575	223	32.60	97.22
Reduzida ou nula	23325	933	24.37	475	19	2.78	100.00
Total	95700	3828	100.00	17100	684	100.00	

Na figura 5.6 são apresentados os resultados da distribuição relativa da área de depósito (%) pelas classes de susceptibilidade e por ângulo de alcance. Estes resultados foram obtidos através da tabulação dos sete modelos de propagação com a área correspondente a depósitos de desabamento e mostram que existe um padrão de distribuição espacial com valores percentuais sempre superiores a 40% da área de depósito concentrada na classe de susceptibilidade elevada, sempre acima dos valores observados na classe de susceptibilidade muito elevada, que contêm entre 15,5% e 23% da área total dos depósitos desabados. Adicionalmente, a classe de susceptibilidade reduzida ou nula apresenta valores percentuais baixos em todos os ângulos. A excepção ao padrão corresponde ao modelo criado com um ângulo de alcance de 15°, que é responsável pelo valor mais elevado na classe de susceptibilidade reduzida ou nula (3.8% da área total do depósito), deixando o valor percentual acumulado das outras três classes ligeiramente abaixo dos 97% característicos dos restantes modelos.

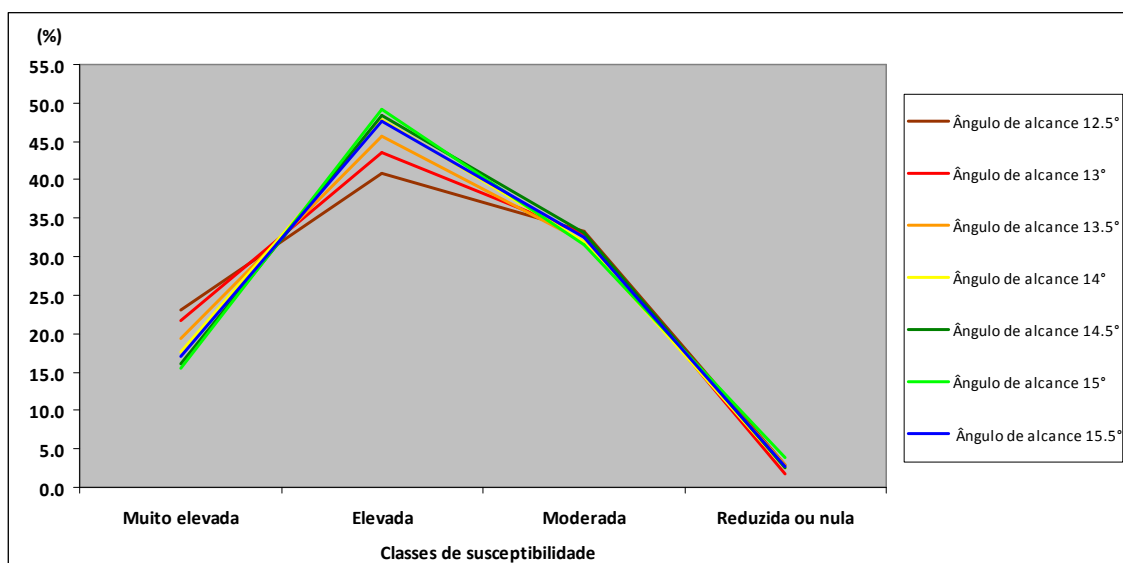


Figura 5.6 – Distribuição relativa da área de depósito, pelas classes de susceptibilidade e por ângulo de alcance na área teste 1.

Na figura 5.7 são apresentados os valores relativos acumulados para cada um dos modelos de propagação. O somatório traduz a abrangência da área classificada face à área dos depósitos, sendo que a situação ideal seria definir uma menor área de propagação que conseguisse abranger a maior fracção da totalidade depósito

presentes na área e, preferencialmente, que essa distribuição correspondesse às classes de susceptibilidade muito elevada e elevada.

Apesar da concentração das áreas de depósito na classe de susceptibilidade muito elevada, ser inferior a 23% da área total de depósito em todos os modelos, os valores acumulados na classe de susceptibilidade moderada, apresenta-se com um resultado adequado, uma vez que apresenta sempre valores relativos superiores a 95%.

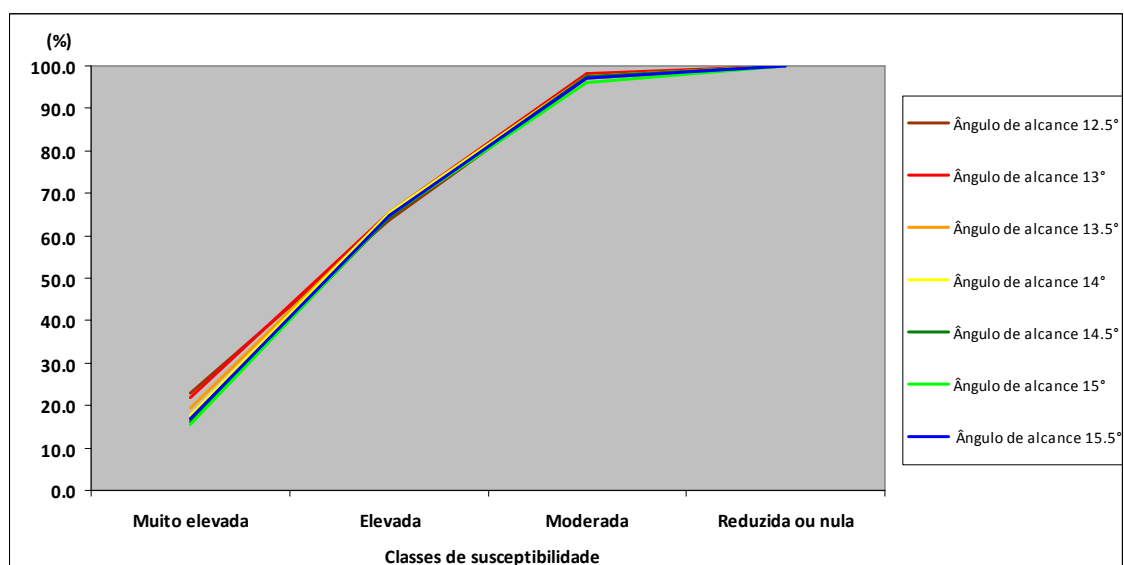


Figura 5.7 – Distribuição relativa acumulada da área de depósito, pelas classes de susceptibilidade e por ângulo de alcance na área teste 1.

A tabela 5.4 permite avaliar o comportamento dos modelos através dos resultados obtidos na tabulação e, assim, definir qual o ângulo de alcance que apresenta os melhores resultados globais.

Tabela 5.4 – Distribuição relativa dos depósitos de desabamento por ângulo de alcance e por classe de susceptibilidade na área de teste 1.

Ângulo de alcance (°)	Classes de susceptibilidade								% dos depósitos abragidos pelas classes
	Muito elevada		Elevada		Moderada		Reduzida ou nula		
	Área da classe (%)	Depósitos (%)	Área da classe (%)	Depósitos (%)	Área da classe (%)	Depósitos (%)	Área da classe (%)	Depósitos (%)	
12.5	24.97	22.95	22.96	40.79	26.73	33.33	25.34	2.92	100.00
13	25.35	21.78	24.05	43.57	25.95	32.89	24.65	1.75	100.00
13.5	25.92	19.44	25.47	45.76	24.84	31.87	23.77	2.92	100.00
14	25.19	17.69	25.72	47.81	24.53	32.02	24.56	2.49	100.00
14.5	24.35	16.08	25.51	48.39	25.42	33.04	24.72	2.49	100.00
15	25.05	15.50	26.27	49.12	24.75	31.58	23.93	3.80	100.00
15.5	24.95	16.96	25.31	47.66	25.37	32.60	24.37	2.78	100.00

No caso da área teste 1, o modelo de propagação que apresenta os melhores resultados globais foi criado com um ângulo de alcance de 13°. Este modelo apresenta o valor acumulado mais elevado nas duas primeiras classes de susceptibilidade (muito elevada e elevada), correspondente a 65.35% da área total de depósito. Adicionalmente, corresponde ao segundo valor percentual da área de depósito concentrada na classe de susceptibilidade muito elevada (21.78%), sendo apenas superado pelo modelo criado com um ângulo de alcance de 12.5° (22.95). Por último, é o modelo que apresenta o valor percentual mais baixo na classe de susceptibilidade reduzida ou nula (1.75%), o que traduz um bom grau de ajustamento do modelo face à distribuição espacial dos depósitos desabados nesta área.

4.2 – Área de teste 2

A área de teste 2 localiza-se na encosta Sul do Monte anticlinal do Formosinho, na encosta sobranceira ao portinho da Arrábida, sendo limitada a Norte pela EN 379-1. À semelhança da área anterior, a área de teste 2 situa-se também no concelho de Setúbal, sendo parte integrante da freguesia de São Lourenço. A zona de rotura é caracterizada pelo afloramento de dolomitos do Jurássico.

Na figura 5.8 pode ser observada a distribuição espacial e a abrangência das áreas de propagação geradas com ângulos de alcance que variam entre os 24° e os 27°, correspondendo aos ângulos de alcance mais elevados utilizados na área de estudo.

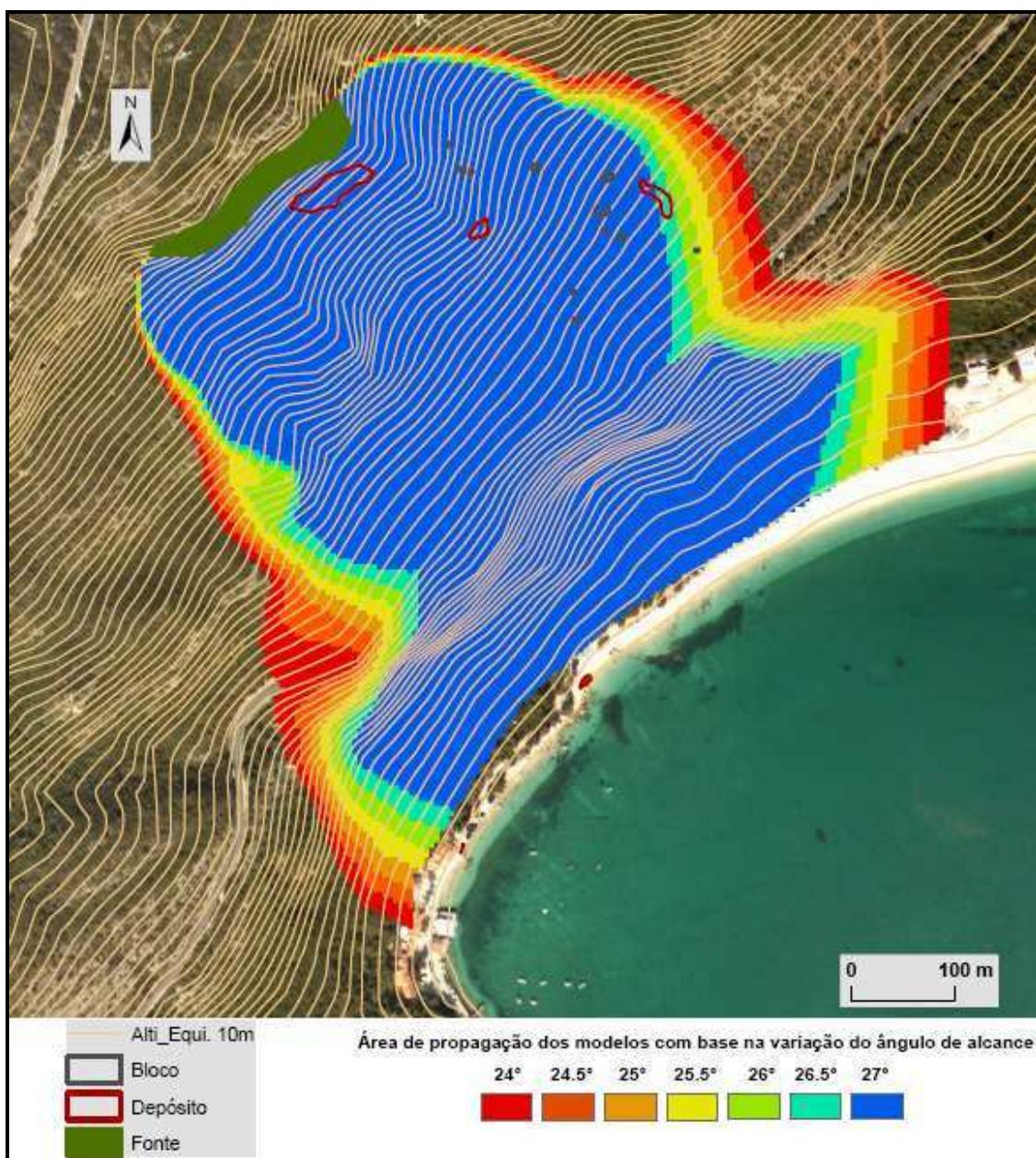


Figura 5.8 – Modelos de propagação de desabamentos associados a ângulos de alcance entre 24° e 27° na área teste 2.

Para a área de teste 2 foi possível identificar e delimitar áreas de depósito que correspondem a uma área total de 2.225m^2 , ou seja 89 células de $5\text{x}5\text{m}$. Quanto às áreas de blocos, estas perfazem uma área total de 325m^2 , o que corresponde a 13 células de $5\text{x}5\text{m}$ (Figura 5.8). A validação foi feita em separado para estes elementos e os resultados encontram-se na tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Distribuição absoluta e relativa das classes de susceptibilidade e resultados da tabulação com as áreas de depósito e áreas de blocos por ângulo de alcance na área teste 2.

Área 2 - Ângulo de alcance 24°											
Classe de susceptibilidade	Área			Tabulação depósitos (2.225 m² = 89 células)				Tabulação blocos (325 m² = 13 células)			
	m²	nº células	% área total	m²	nº células	% depósitos	% acum	m²	nº células	% blocos	% acum
Muito elevada	94225	3769	26.25	0	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00
Elevada	86525	3461	24.11	350	14	15.73	15.73	175	7	53.85	53.85
Moderada	90250	3610	25.14	1875	75	84.27	100.00	150	6	46.15	100.00
Reduzida ou nula	87925	3517	24.50	0	0	0.00	-----	0	0	0.00	-----
Total	358925	14357	100.00	2225	89	100.00		325	13	100.00	

Área 2 - Ângulo de alcance 24.5°											
Classe de susceptibilidade	Área			Tabulação depósitos (2.225 m² = 89 células)				Tabulação blocos (325 m² = 13 células)			
	m²	nº células	% área total	m²	nº células	% depósitos	% acum	m²	nº células	% blocos	% acum
Muito elevada	85300	3412	25.08	0	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00
Elevada	85425	3417	25.11	425	17	19.10	19.10	175	7	53.85	53.85
Moderada	86500	3460	25.43	1800	72	80.90	100.00	150	6	46.15	100.00
Reduzida ou nula	82950	3318	24.38	0	0	0.00	-----	0	0	0.00	-----
Total	340175	13607	100.00	2225	89	100.00		325	13	100.00	

Área 2 - Ângulo de alcance 25°											
Classe de susceptibilidade	Área			Tabulação depósitos (2.225 m² = 89 células)				Tabulação blocos (325 m² = 13 células)			
	m²	nº células	% área total	m²	nº células	% depósitos	% acum	m²	nº células	% blocos	% acum
Muito elevada	80675	3227	24.98	0	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00
Elevada	81325	3253	25.19	575	23	25.84	25.84	25	1	7.69	7.69
Moderada	83150	3326	25.75	1650	66	74.16	100.00	275	11	84.62	92.31
Reduzida ou nula	77775	3111	24.08	0	0	0.00	-----	25	1	7.69	100.00
Total	322925	12917	100.00	2225	89	100.00		325	13	100.00	

Área 2 - Ângulo de alcance 25.5°											
Classe de susceptibilidade	Área			Tabulação depósitos (2.225 m² = 89 células)				Tabulação blocos (325 m² = 13 células)			
	m²	nº células	% área total	m²	nº células	% depósitos	% acum	m²	nº células	% blocos	% acum
Muito elevada	78500	3140	25.55	0	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00
Elevada	76075	3043	24.76	300	12	13.48	13.48	25	1	7.69	7.69
Moderada	78725	3149	25.62	1050	42	47.19	60.67	275	11	84.62	92.31
Reduzida ou nula	73950	2958	24.07	875	35	39.33	100.00	25	1	7.69	100.00
Total	307250	12290	100.00	2225	89	100.00		325	13	100.00	

Área 2 - Ângulo de alcance 26°											
Classe de susceptibilidade	Área			Tabulação depósitos (2.225 m² = 89 células)				Tabulação blocos (325 m² = 13 células)			
	m²	nº células	% área total	m²	nº células	% depósitos	% acum	m²	nº células	% blocos	% acum
Muito elevada	72775	2911	25.01	0	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00
Elevada	73675	2947	25.32	1150	46	51.69	51.69	50	2	15.38	15.38
Moderada	73525	2941	25.27	700	28	31.46	83.15	250	10	76.92	92.31
Reduzida ou nula	71000	2840	24.40	375	15	16.85	100.00	0	0	0.00	-----
Total	290975	11639	100.00	2225	89	100.00		300	12	92.31	

Área 2 - Ângulo de alcance 26.5°											
Classe de susceptibilidade	Área			Tabulação depósitos (2.225 m² = 89 células)				Tabulação blocos (325 m² = 13 células)			
	m²	nº células	% área total	m²	nº células	% depósitos	% acum	m²	nº células	% blocos	% acum
Muito elevada	69375	2775	25.35	0	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00
Elevada	69400	2776	25.36	1375	55	61.80	61.80	0	0	0.00	0.00
Moderada	67750	2710	24.76	475	19	21.35	83.15	250	10	76.92	76.92
Reduzida ou nula	67125	2685	24.53	375	15	16.85	100.00	0	0	0.00	-----
Total	273650	10946	100.00	2225	89	100.00		250	10	76.92	

Área 2 - Ângulo de alcance 27°											
Classe de susceptibilidade	Área			Tabulação depósitos (2.225 m² = 89 células)				Tabulação blocos (325 m² = 13 células)			
	m²	nº células	% área total	m²	nº células	% depósitos	% acum	m²	nº células	% blocos	% acum
Muito elevada	64925	2597	25.25	0	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00
Elevada	63700	2548	24.78	1750	70	78.65	78.65	100	4	30.77	30.77
Moderada	66450	2658	25.85	100	4	4.49	83.15	200	8	61.54	92.31
Reduzida ou nula	62025	2481	24.12	100	4	4.49	87.64	0	0	0.00	-----
Total	257100	10284	100.00	1950	78	87.64		300	12	92.31	

O ângulo de alcance máximo que possibilita abranger a totalidade das áreas de depósitos e de blocos corresponde a 25.5°. Ângulos superiores, entre 26° e 26.5°, abrangem apenas a totalidade das áreas de depósito. Com a utilização do ângulo máximo de 27°, a área de propagação deixa de abranger a totalidade das áreas de depósito (integra apenas 87.64% da sua superfície total). Ângulos de alcance de 24°, 24.5° e 25° permitem integrar a totalidade da área de depósito em apenas duas classes de susceptibilidade (elevada e moderada), deixando a classe de susceptibilidade reduzida ou nula sem áreas de depósito, o que traduz uma situação ideal. É de realçar que a classe de susceptibilidade muito elevada não apresenta sobreposição com as áreas de depósito, em qualquer dos modelos de propagação produzidos com diferentes ângulos de alcance. Quanto às áreas de blocos, verifica-se a mesma situação em relação a classe de susceptibilidade muito elevada, ou seja, ela não capta qualquer das evidências existentes no terreno, independentemente do ângulo de alcance considerado. No que respeita à classe de susceptibilidade reduzida ou nula a situação é semelhante à observada para as áreas de depósito, mas com ângulos de alcance de 24° e 24.5°. Valores superiores de ângulo de alcance (25° e 25.5°) passam a incluir na classe de susceptibilidade reduzida ou nula áreas de blocos. No entanto, os ângulos de alcance de 26° a 27° passam novamente a concentrar as áreas de blocos nas classes de susceptibilidade elevada e moderada. Importa referir que estes últimos ângulos apenas conseguem abranger 92.31% da área total dos blocos existentes na vertente. Neste caso, parece mais razoável basear a análise da susceptibilidade nos blocos isolados, no seguimento do proposto por Abruzzese *et al.* (2009), que entendem que a delimitação das áreas de susceptibilidade pode ser concentrada nos blocos mais afastados da fonte de desabamentos, o que os autores definem como *Extreme Blocks*. Como se verifica na figura 5.9, quando se consideram ângulos de alcance de 24°, 24.5° e 25°, a totalidade da área de depósito é atingida em apenas duas classes de susceptibilidade (elevada e moderada), deixando a classe de susceptibilidade reduzida ou nula sem áreas de depósito, o que traduz uma situação ideal. No entanto, os modelos de propagação com ângulos de alcance de 26°, 26.5° e 27° determinam a maior concentração dos depósitos desabados na classe de susceptibilidade elevada.

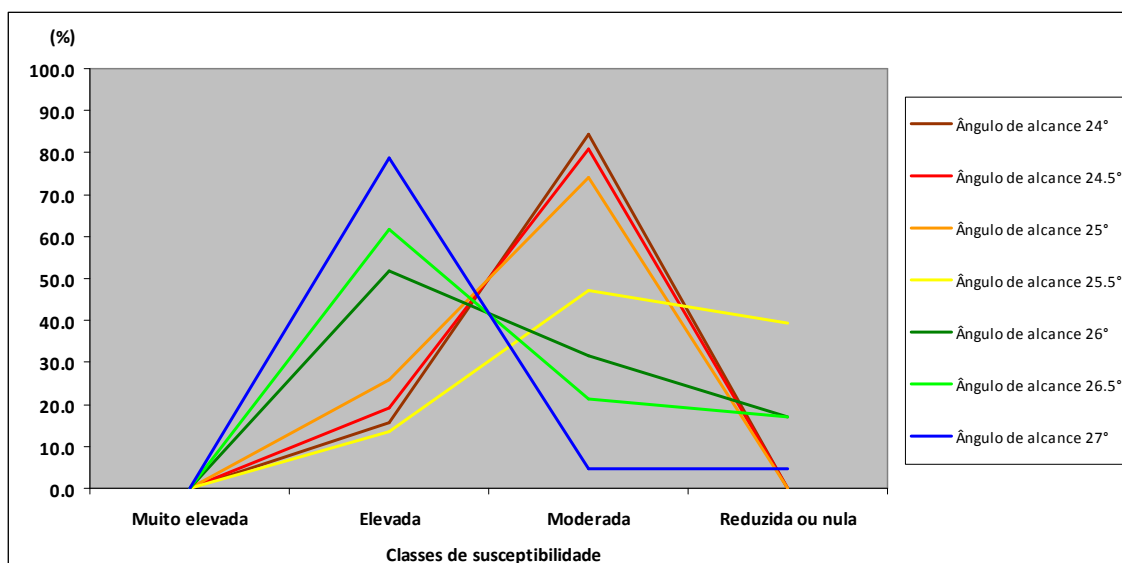


Figura 5.9 – Distribuição relativa da área de depósito, pelas classes de susceptibilidade e por ângulo de alcance na área teste 2.

A figura 5.10 mostra que a generalidade dos modelos de propagação concentra nas três primeiras classes de susceptibilidade a grande maioria da área de depósito. A excepção corresponde ao modelo gerado pelo ângulo de alcance de 25.5°, que apresenta um desempenho mais modesto, com apenas 60.67% da área de depósito nas 3 primeiras classes, ou seja, bastante abaixo dos valores equivalentes obtidos pelos restantes modelos (sempre acima de 83%).

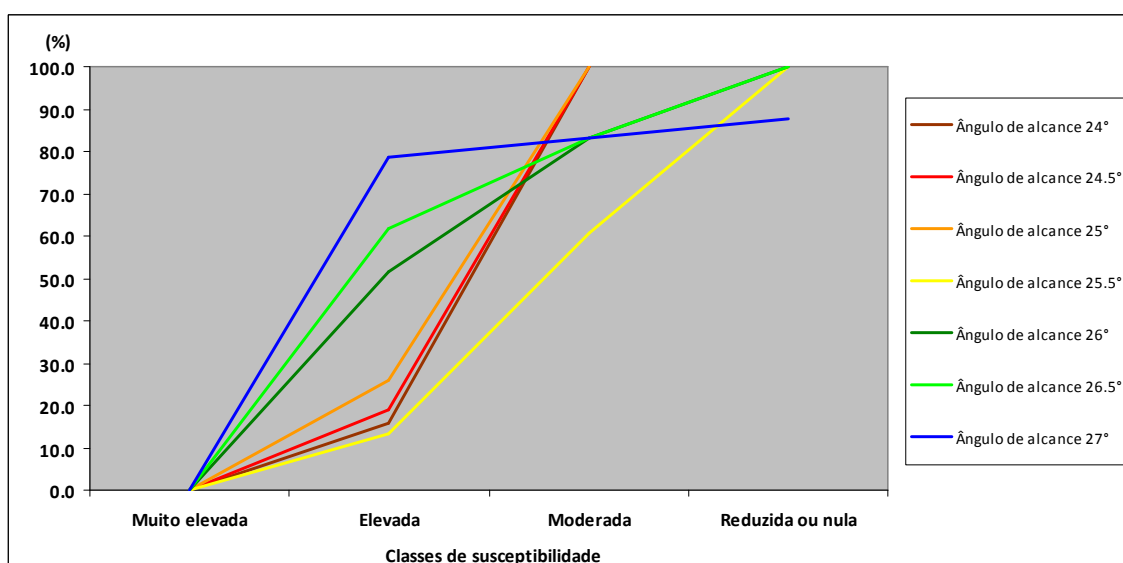


Figura 5.10 – Distribuição relativa acumulada da área de depósito, pelas classes de susceptibilidade e por ângulo de alcance na área teste 2.

Quanto às áreas de blocos (figura 5.11), verifica-se a classe de susceptibilidade reduzida ou nula não inclui blocos desabados, com ângulos de alcance de 24° e 24.5°, ao contrário do que se verifica com ângulos de alcance ligeiramente superiores (25° e 25.5°). Os ângulos de alcance de 26°, 26.5° e 27° fazem concentrar, novamente, os blocos desabados nas classes de susceptibilidade elevada e moderada, embora com valores diferenciados. No entanto, importa referir que estes ângulos não conseguem abranger a totalidade dos blocos desabados, incluindo apenas entre 77% e 92% da sua superfície total.

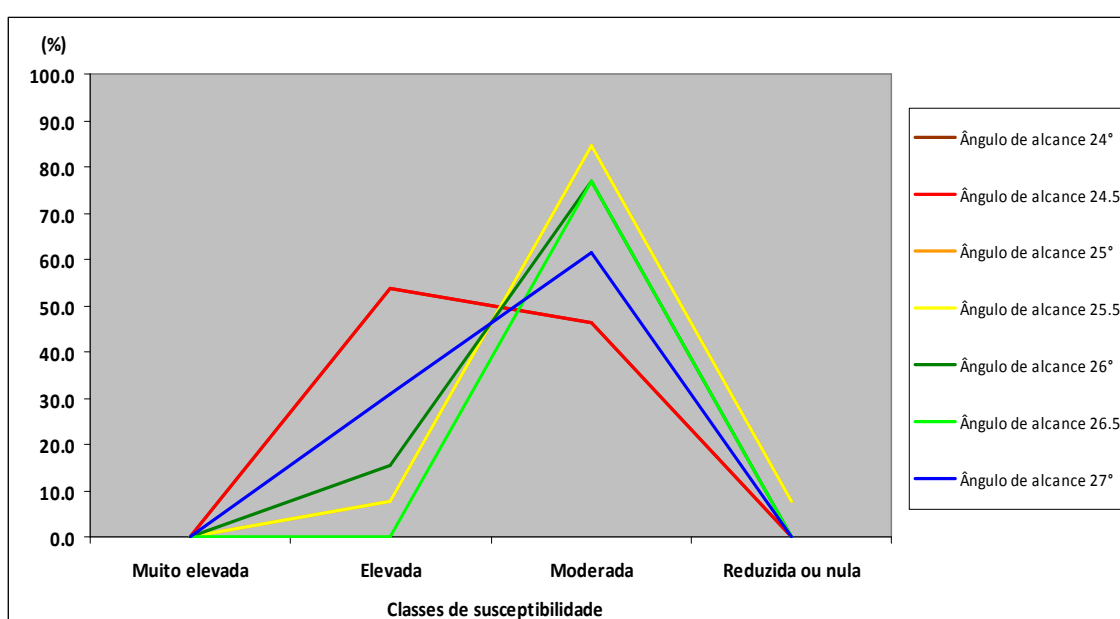


Figura 5.11 – Distribuição relativa das áreas de blocos, pelas classes de susceptibilidade e por ângulo de alcance na área teste 2.

A figura 5.12 mostra que o modelo de propagação que apresenta o melhor desempenho, tendo em conta a localização dos blocos desabados, é o correspondente ao ângulo de alcance de 24.5°.

A tabela 5.6 sintetiza os resultados obtidos para a área teste 2, sendo evidente que, apesar da utilização de diferentes ângulos de alcance, não foi possível chegar a um modelo de susceptibilidade à propagação de desabamentos que conseguisse integrar as áreas de depósito ou de blocos desabados na classe de susceptibilidade muito elevada. Para além disso, a presença de depósitos e blocos torna a escolha do ângulo mais adequado ainda mais difícil, uma vez que os resultados obtidos apresentam, por vezes, uma variação contrária.

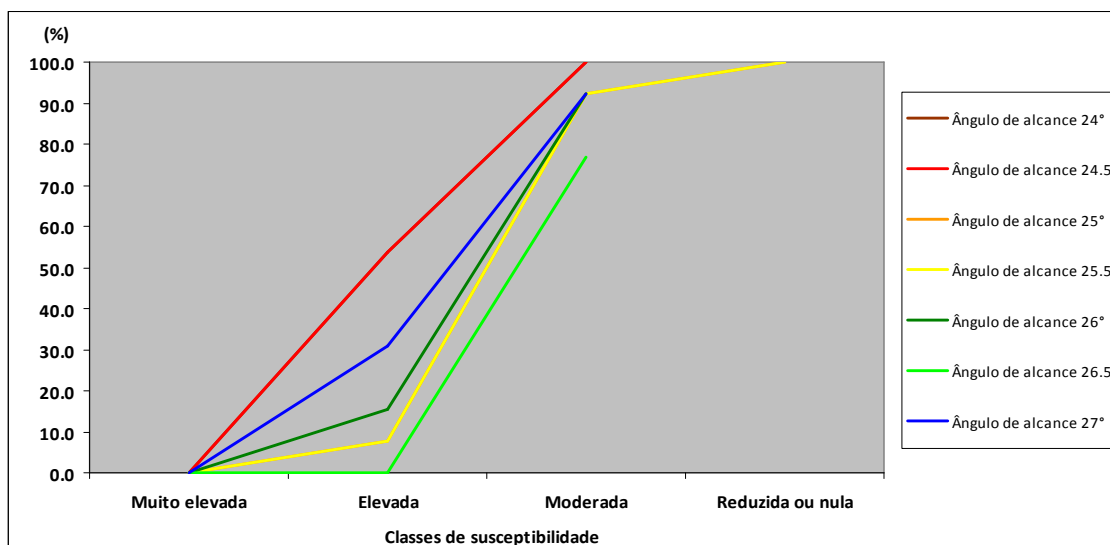


Figura 5.12 – Distribuição relativa acumulada das áreas de blocos, pelas classes de susceptibilidade e por ângulo de alcance na área teste 2.

Tabela 5.6 – Distribuição relativa dos depósitos e dos blocos desabados por ângulo de alcance e por classe de susceptibilidade na área de teste 2.

Ângulo de alcance (°)	Classes de susceptibilidade												% dos depósitos abragidos pelas classes	% dos blocos abragidos pelas classes
	Muito elevada			Elevada			Moderada			Reduzida ou nula				
	Área da classe (%)	Depósitos (%)	Blocos (%)	Área da classe (%)	Depósitos (%)	Blocos (%)	Área da classe (%)	Depósitos (%)	Blocos (%)	Área da classe (%)	Depósitos (%)	Blocos (%)		
24	26.25	0.00	0.00	24.11	15.73	53.85	25.14	84.27	46.15	24.50	0.00	0.00	100.00	100.00
24.5	25.08	0.00	0.00	25.11	19.10	53.85	25.43	80.90	46.15	24.38	0.00	0.00	100.00	100.00
25	24.98	0.00	0.00	25.19	25.84	7.69	25.75	74.16	84.62	24.08	0.00	7.69	100.00	100.00
25.5	25.55	0.00	0.00	24.76	13.48	7.69	25.62	47.19	84.62	24.07	39.33	7.69	100.00	100.00
26	25.01	0.00	0.00	25.32	51.69	15.38	25.27	31.46	76.92	24.40	16.85	0.00	100.00	92.31
26.5	25.35	0.00	0.00	25.36	61.80	0.00	24.76	21.35	76.92	24.53	16.85	0.00	100.00	76.92
27	25.25	0.00	0.00	24.78	78.65	30.77	25.85	4.49	61.54	24.12	4.49	0.00	87.64	92.31

Os valores percentuais mais elevados de blocos desabados na classe de susceptibilidade elevada são obtidos com os valores de ângulo de alcance mais baixos da gama de valores utilizados (24° e 24.5°). Pelo contrário, as áreas dos depósitos desabados são melhor integradas na classe de susceptibilidade elevada pelos modelos produzidos com os ângulos de alcance mais elevados (26°, 26.5° e 27°). No entanto, todos os modelos de propagação com ângulo de alcance acima de 25° validam

superfícies de depósitos de desabamento significativas na classe de susceptibilidade mais baixa, o que representa uma situação indesejável. Em contrapartida, os modelos com ângulo de alcance mais baixo (inferior a 25.5°) garantem a ausência de depósitos de desabamento na classe de susceptibilidade reduzida ou nula. Face a estes resultados, considera-se que o modelo criado com o ângulo de alcance de 24.5° é o que apresenta melhores resultados globais, na validação conjunta dos depósitos e blocos desabados.

4.3 – Área de teste 3

A área de teste 3 corresponde a um segmento da vertente Sul da serra do Louro, localizando-se no concelho de Palmela, freguesia de Quinta do Anjo. O limite ocidental da área de teste é marcado pela existência de uma portela que marca a separação entre a serra do Louro e a serra de São Francisco, posicionada no mesmo alinhamento de relevos. A área de teste 3 é caracterizada pelo afloramento de calcários margosos de idade miocénica, na zona de rotura.

A figura 5.13 ilustra a distribuição espacial das áreas de propagação de sete modelos gerados com ângulos de alcance entre 17° e 20° . As áreas desabadas existentes na área teste e utilizadas para validação dos modelos incluem 180.200m^2 de depósitos de desabamento e 800m^2 de blocos isolado, correspondendo assim a área de teste onde se verifica a maior concentração, por tipologia, em toda a área de estudo.

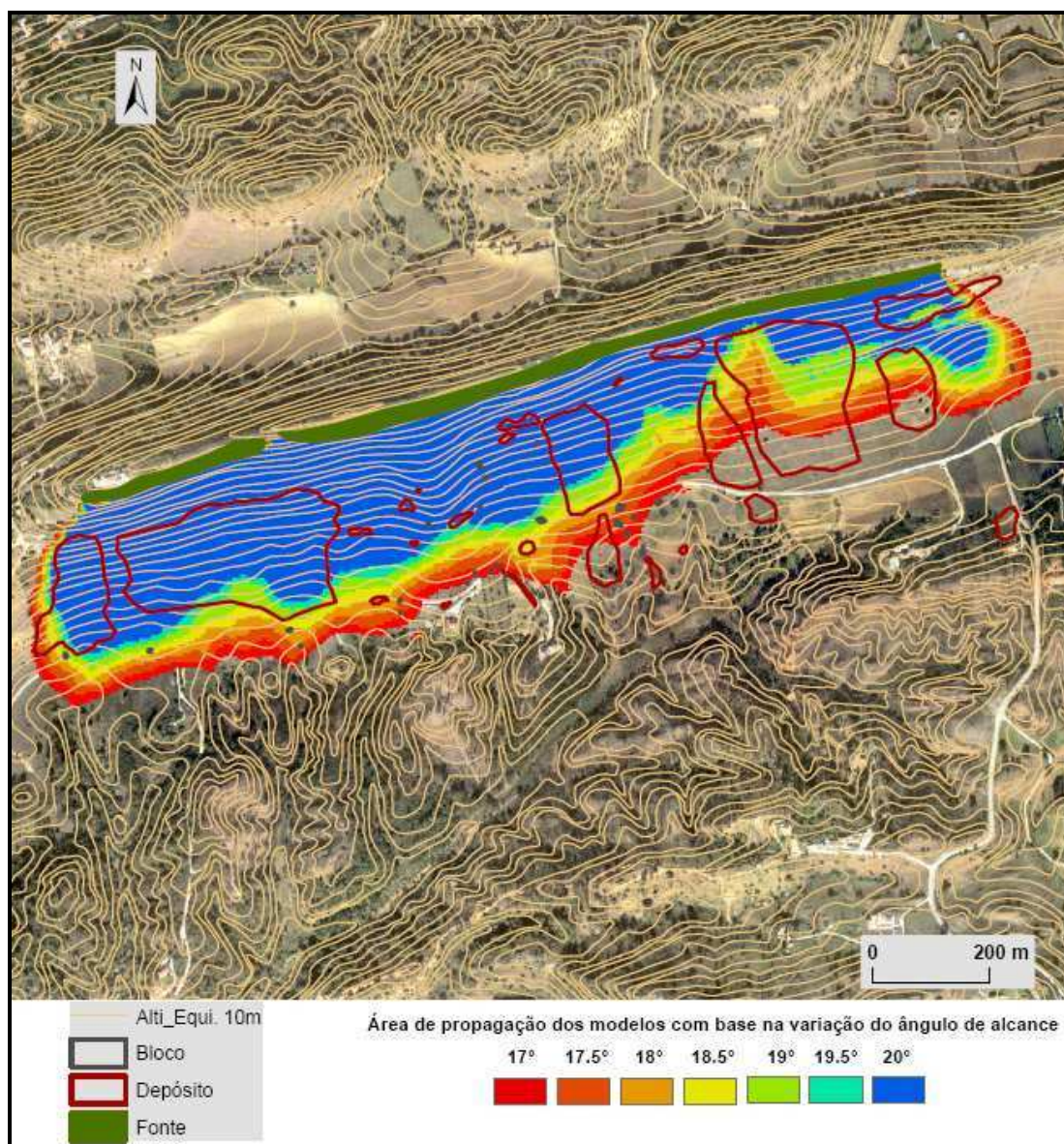


Figura 5.13 – Modelos de propagação de deslizamentos associados a ângulos de alcance entre 17° e 20° na área teste 3.

Independentemente do ângulo de alcance utilizado na área teste 3, não foi possível criar um modelo de propagação que conseguisse abranger a totalidade das áreas de depósitos de deslizamento ou os blocos deslizados isolados. Os dados sintetizados na tabela 5.7 mostram que a utilização de ângulos de alcance mais baixos (17° e 17.5°) permite abranger maior área dos depósitos deslizados (85.86% e 82.67% do total, respectivamente). Uma situação idêntica foi verificada na tabulação com as áreas dos blocos isolados, com variações ainda mais acentuadas, sendo o valor máximo obtido com o modelo criado com o ângulo de alcance de 17° (53.13% da superfície total dos blocos). Com a utilização do ângulo de alcance de 17.5° o valor baixa praticamente 10

pontos percentuais, para 43.75%. Os restantes ângulos de alcance demonstram ser incapazes de abranger a totalidade dos depósitos e dos blocos desabados. Com efeito, os ângulos de alcance mais elevados (19.5° e 20°) apenas abrangem 9.38% da totalidade dos blocos isolados.

O modelo criado com um ângulo de alcance de 17° é o que apresenta os melhores resultados segundo um dos critérios previamente definidos: maior concentração percentual das áreas de depósito e de blocos nas classes de susceptibilidade muito elevada e elevada.

Tabela 5.7 – Distribuição absoluta e relativa das classes de susceptibilidade e resultados da tabulação com as áreas de depósito e áreas de blocos por ângulo de alcance na área teste 3.

Área 3 - Ângulo de alcance 17°											
Classe de susceptibilidade	Área			Tabulação depósitos (180.200 m² = 7208 células)				Tabulação blocos (800 m² = 32 células)			
	m²	nº células	% área total	m²	nº células	% depósitos	% acum	m²	nº células	% blocos	% acum
Muito elevada	128825	5153	25.53	51725	2069	28.70	28.70	125	5	15.63	15.63
Elevada	128425	5137	25.45	32650	1306	18.12	46.82	150	6	18.75	34.38
Moderada	127325	5093	25.23	33625	1345	18.66	65.48	75	3	9.38	43.75
Reduzida ou nula	120100	4804	23.80	36725	1469	20.38	85.86	75	3	9.38	53.13
Total	504675	20187	100.00	154725	6189	85.86		425	17	53.13	

Área 3 - Ângulo de alcance 17.5°											
Classe de susceptibilidade	Área			Tabulação depósitos (180.200 m² = 7208 células)				Tabulação blocos (800 m² = 32 células)			
	m²	nº células	% área total	m²	nº células	% depósitos	% acum	m²	nº células	% blocos	% acum
Muito elevada	117500	4700	24.76	51475	2059	28.57	28.57	100	4	12.50	12.50
Elevada	119250	4770	25.13	32400	1296	17.98	46.55	50	2	6.25	18.75
Moderada	118400	4736	24.95	24825	993	13.78	60.32	150	6	18.75	37.50
Reduzida ou nula	119450	4778	25.17	40275	1611	22.35	82.67	50	2	6.25	43.75
Total	474600	18984	100.00	148975	5959	82.67		350	14	43.75	

Área 3 - Ângulo de alcance 18°											
Classe de susceptibilidade	Área			Tabulação depósitos (180.200 m² = 7208 células)				Tabulação blocos (800 m² = 32 células)			
	m²	Nº Pixels	%	m²	Nº Pixels	%	% ACUM	m²	Nº Pixels	%	% ACUM
Muito elevada	109075	4363	25.51	51475	2059	28.57	28.57	75	3	9.38	9.38
Elevada	106275	4251	24.86	29700	1188	16.48	45.05	50	2	6.25	15.63
Moderada	110250	4410	25.79	22200	888	12.32	57.37	50	2	6.25	21.88
Reduzida ou nula	101900	4076	23.84	36100	1444	20.03	77.40	75	3	9.38	31.25
Total	427500	17100	100.00	139475	5579	77.40		250	10	31.25	

Área 3 - Ângulo de alcance 18.5°											
Classe de susceptibilidade	Área			Tabulação depósitos (180.200 m² = 7208 células)				Tabulação blocos (800 m² = 32 células)			
	m²	nº células	% área total	m²	nº células	% depósitos	% acum	m²	nº células	% blocos	% acum
Muito elevada	96125	3845	24.81	46175	1847	25.62	25.62	75	3	9.38	9.38
Elevada	100125	4005	25.84	29800	1192	16.54	42.16	0	0	0.00	9.38
Moderada	100350	4014	25.90	22300	892	12.38	54.54	100	4	12.50	21.88
Reduzida ou nula	90825	3633	23.44	31375	1255	17.41	71.95	0	0	0.00	-----
Total	387425	15497	100.00	129650	5186	71.95		175	7	21.88	

Área 3 - Ângulo de alcance 19°											
Classe de susceptibilidade	Área			Tabulação depósitos (180.200 m² = 7208 células)				Tabulação blocos (800 m² = 32 células)			
	m²	nº células	% área total	m²	nº células	% depósitos	% acum	m²	nº células	% blocos	% acum
Muito elevada	88525	3541	24.40	42075	1683	23.35	23.35	75	3	9.38	9.38
Elevada	91950	3678	25.34	29050	1162	16.12	39.47	0	0	0.00	9.38
Moderada	89775	3591	24.74	20625	825	11.45	50.92	0	0	0.00	9.38
Reduzida ou nula	92600	3704	25.52	31075	1243	17.24	68.16	50	2	6.25	15.63
Total	362850	14514	100.00	122825	4913	68.16		125	5	15.63	

Área 3 - Ângulo de alcance 19.5°											
Classe de susceptibilidade	Área			Tabulação depósitos (180.200 m² = 7208 células)				Tabulação blocos (800 m² = 32 células)			
	m²	nº células	% área total	m²	nº células	% depósitos	% acum	m²	nº células	% blocos	% acum
Muito elevada	81175	3247	25.77	38250	1530	21.23	21.23	75	3	9.38	9.38
Elevada	81825	3273	25.97	26475	1059	14.69	35.92	0	0	0.00	-----
Moderada	86325	3453	27.40	20950	838	11.63	47.54	0	0	0.00	-----
Reduzida ou nula	65725	2629	20.86	18075	723	10.03	57.57	0	0	0.00	-----
Total	315050	12602	100.00	103750	4150	57.57		75	3	9.38	

Área 3 - Ângulo de alcance 20°											
Classe de susceptibilidade	Área			Tabulação depósitos (180.200 m² = 7208 células)				Tabulação blocos (800 m² = 32 células)			
	m²	nº células	% área total	m²	nº células	% depósitos	% acum	m²	nº células	% blocos	% acum
Muito elevada	71850	2874	24.10	33050	1322	18.34	18.34	75	3	9.38	9.38
Elevada	74875	2995	25.12	25400	1016	14.10	32.44	0	0	0.00	-----
Moderada	74000	2960	24.82	19000	760	10.54	42.98	0	0	0.00	-----
Reduzida ou nula	77375	3095	25.96	18275	731	10.14	53.12	0	0	0.00	-----
Total	298100	11924	100.00	95725	3829	53.12		75	3	9.38	

Como se observa na figura 5.14, a classe de susceptibilidade muito elevada é a que valida mais área dos depósitos de desabamento, situação verificada em todos os modelos, sendo que o melhor desempenho se verifica nos modelos gerados com os ângulos mais baixos.

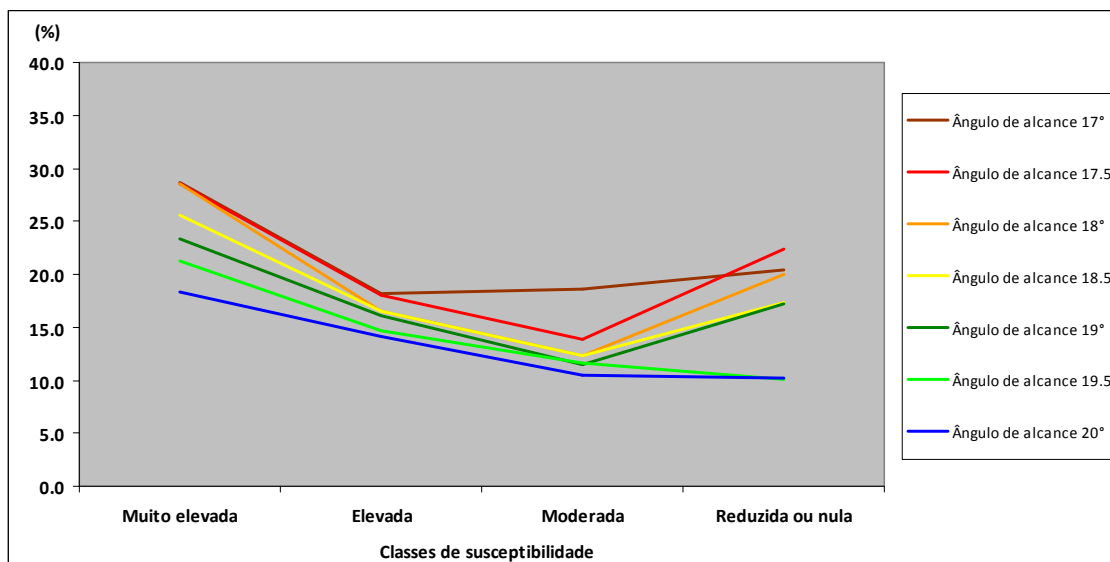


Figura 5.14 – Distribuição relativa das áreas de depósito, pelas classes de susceptibilidade e por ângulo de alcance na área teste 3.

Contudo, são os modelos gerados com os ângulos de alcance mais elevados (19.5° e 20°) que apresentam uma distribuição “ideal”; isto é, uma distribuição das áreas dos depósitos com maior concentração na classe de susceptibilidade mais elevada e uma progressiva diminuição a acompanhar a diminuição do grau de susceptibilidade.

Quando analisados os valores acumulados em cada modelo (figura 5.15), é notório que existe uma proximidade na distribuição relativa da área nas classes de susceptibilidade muito elevada e elevada, e que esta apresenta uma variação significativa quando é atingida a classes de susceptibilidade reduzida ou nula. Com efeito, enquanto o modelo gerado com o ângulo mínimo consegue validar 85.86% da área total de depósitos, o modelo produzido com o ângulo máximo apenas é capaz de abarcar 53.12% da superfície dos depósitos.

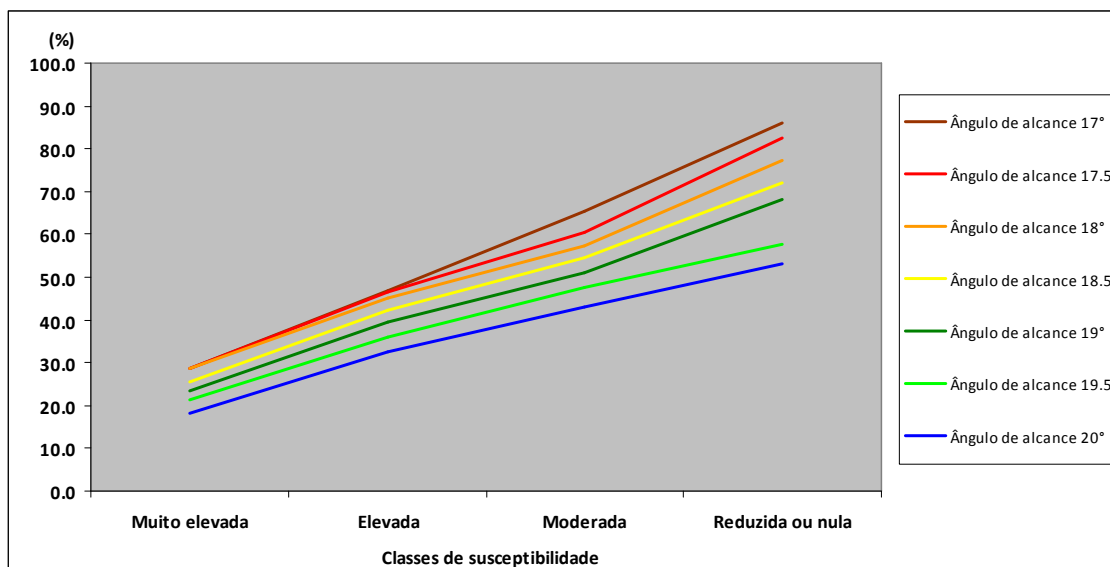


Figura 5.15 – Distribuição relativa acumulada da área de depósito, pelas classes de susceptibilidade e por ângulo de alcance na área teste 3.

A figura 5.16 mostra que a distribuição dos blocos desabados isolados pelas classes de susceptibilidade é bastante mais irregular por comparação com os depósitos de desabamento. Refira-se que os modelos correspondentes aos ângulos de alcance de 19.5° e 20° registam exactamente a mesma distribuição de blocos desabados nas classes de susceptibilidade. O modelo criado com o ângulo de alcance mínimo (17°) é aquele que apresenta uma distribuição mais adequada, concentrando os valores mais elevados de blocos desabados nas classes de susceptibilidade muito elevada (15.63% do total) e elevada (15.63% e 18.75% do total da área dos blocos, respectivamente).

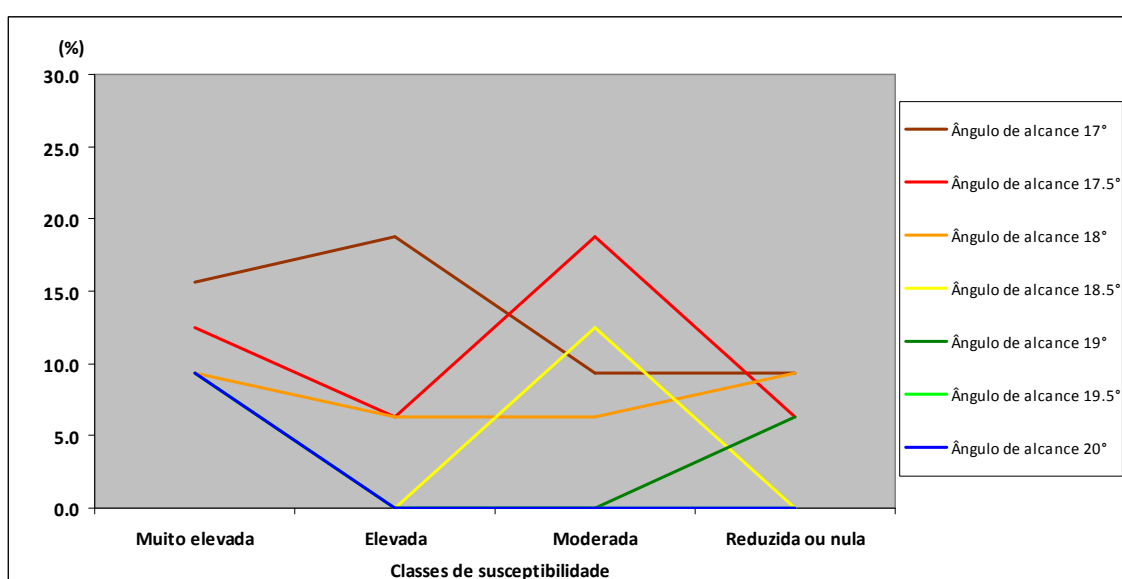


Figura 5.16 – Distribuição relativa das áreas de blocos, pelas classes de susceptibilidade e por ângulo de alcance na área teste 3

A figura 5.17 demonstra que valores de ângulo de alcance $\geq 19^\circ$, deixam de ser interessantes, uma vez que os blocos incluídos nas áreas de propagação se restringem, no máximo, a 15.63% do total. No caso dos modelos com ângulos de alcance de 19.5° e 20° esse valor reduz-se a 9.38%, o que leva à sua não representação na figura, uma vez os blocos apenas se sobrepõem à classe de susceptibilidade muito elevada.

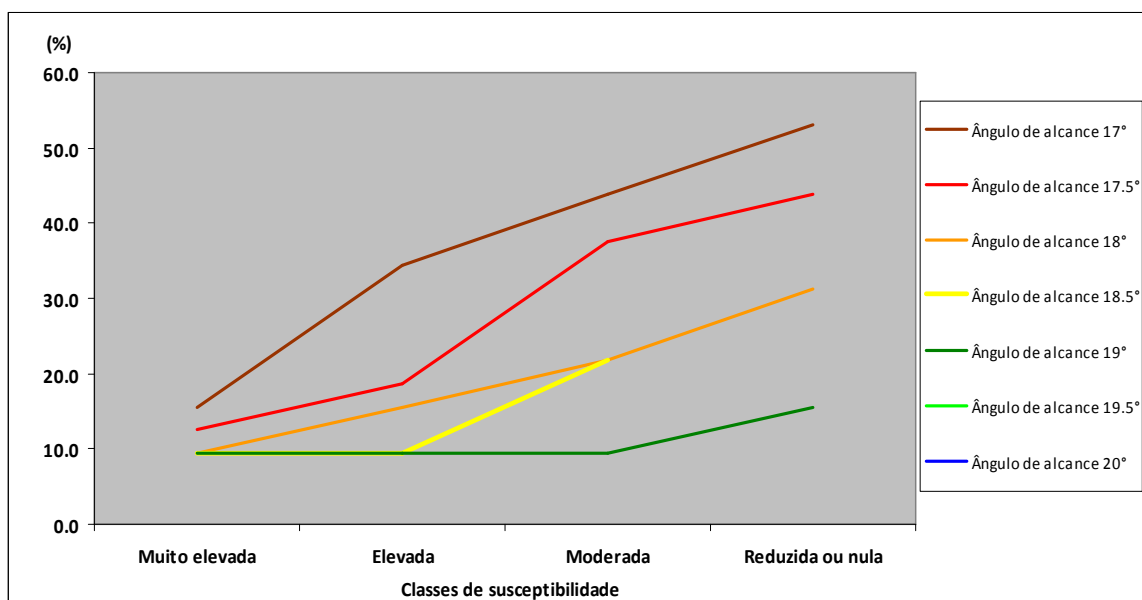


Figura 5.17 – Distribuição relativa acumulada das áreas de blocos, pelas classes de susceptibilidade e por ângulo de alcance na área teste 3.

A tabela 5.8 sintetiza os resultados obtidos para a área teste 3, mostrando que o modelo com ângulo de alcance de 17° é o que produz melhores resultados de validação nas classes de susceptibilidade muito elevada e elevada, para os depósitos e blocos desabados. Adicionalmente, o incremento do ângulo de alcance reflecte-se na redução significativa da área de depósitos e de blocos desabados isolados que ocorrem na mancha de propagação na área teste, pelo que se conclui tratar de valores não realistas.

Tabela 5.8 – Distribuição relativa dos depósitos e dos blocos desabados por ângulo de alcance e por classe de susceptibilidade na área de teste 3.

Ângulo de alcance (°)	Classes de susceptibilidade												% dos depósitos abragidos pelas classes	% dos blocos abragidos pelas classes
	Muito elevada			Elevada			Moderada			Reduzida ou nula				
	Área da classe (%)	Depósitos (%)	Blocos (%)	Área da classe (%)	Depósitos (%)	Blocos (%)	Área da classe (%)	Depósitos (%)	Blocos (%)	Área da classe (%)	Depósitos (%)	Blocos (%)		
17	25.52	28.70	15.63	25.45	18.12	18.75	25.23	18.66	9.38	23.80	20.38	9.38	85.86	53.13
17.5	24.75	28.57	12.50	25.13	17.98	6.25	24.95	13.78	18.75	25.17	22.35	6.25	82.67	43.75
18	25.51	28.57	9.38	24.86	16.48	6.25	25.79	12.32	6.25	23.84	20.03	9.38	77.40	31.25
18.5	24.81	25.62	9.38	25.84	16.54	0.00	25.90	12.38	12.50	23.45	17.41	0.00	71.95	21.88
19	24.40	23.35	9.38	25.34	16.12	0.00	24.74	11.45	0.00	25.52	17.24	6.25	68.16	15.63
19.5	25.77	21.23	9.38	25.97	14.69	0.00	27.40	11.63	0.00	20.86	10.03	0.00	57.57	9.38
20	24.10	18.34	9.38	25.12	14.10	0.00	24.82	10.54	0.00	25.96	10.14	0.00	53.12	9.38

4.4 – Área de teste 4

A área de teste 4 encontra-se no mesmo alinhamento de relevo da área anterior, na vertente Sul da serra de São Francisco. Quanto a divisão administrativa pertence ao mesmo concelho (Palmela) e à mesma freguesia (Quinta do Anjo). A zona de rotura é caracterizada pelo afloramento dos calcários da Senhora das Necessidades, de idade paleogénica.

A figura 46 ilustra a distribuição espacial de sete modelos de propagação produzidos com ângulos de alcance entre 17° e 20°. As áreas desabadas existentes na área teste e utilizadas para validação dos modelos incluem depósitos de desabamento (5.975 m²) e blocos isolados (350 m²). A tabela 34 sintetiza os resultados obtidos.

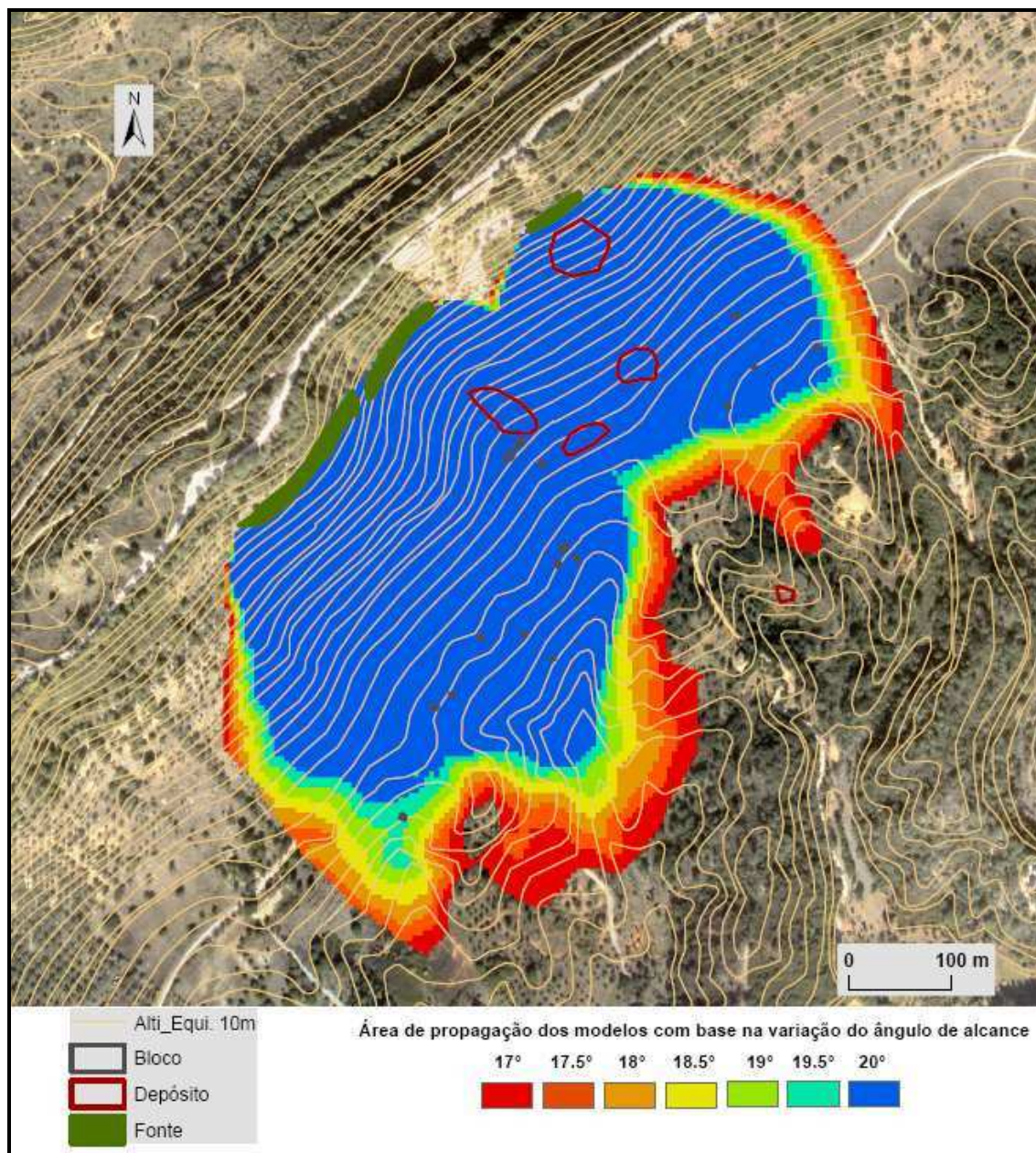


Figura 5.18 – Modelos de propagação de desabamentos associados a ângulos de alcance entre 17° e 20° na área teste 4.

Tabela 5.9 – Distribuição absoluta e relativa das classes de susceptibilidade e resultados da tabulação com as áreas de depósito e áreas de blocos por ângulo de alcance na área teste 4.

Área 4 - Ângulo de alcance 17°											
Classe de susceptibilidade	Área			Tabulação depósitos (5.975 m² = 239 células)				Tabulação blocos (350 m² = 14 células)			
	m²	nº células	% área total	m²	nº células	% depósitos	% acum	m²	nº células	% blocos	% acum
Muito elevada	58700	2348	20.00	2375	95	39.75	39.75	275	11	78.57	78.57
Elevada	64700	2588	22.05	0	0	0.00	39.75	50	2	14.29	92.86
Moderada	59375	2375	20.23	1050	42	17.57	57.32	0	0	0.00	92.86
Reduzida ou nula	110675	4427	37.72	2375	95	39.75	97.07	25	1	7.14	100.00
Total	293450	11738	100.00	5800	232	97.07		350	14	100.00	

Área 4 - Ângulo de alcance 17.5°											
Classe de susceptibilidade	Área			Tabulação depósitos (5.975 m² = 239 células)				Tabulação blocos (350 m² = 14 células)			
	m²	nº células	% área total	m²	nº células	% depósitos	% acum	m²	nº células	% blocos	% acum
Muito elevada	52500	2100	19.36	2350	94	39.33	39.33	275	11	78.57	78.57
Elevada	59425	2377	21.92	25	1	0.42	39.75	25	1	7.14	85.71
Moderada	94775	3791	34.95	2825	113	47.28	87.03	50	2	14.29	100.00
Reduzida ou nula	64450	2578	23.77	600	24	10.04	97.07	0	0	0.00	-----
Total	271150	10846	100.00	5800	232	97.07		350	14	100.00	

Área 4 - Ângulo de alcance 18°											
Classe de susceptibilidade	Área			Tabulação depósitos (5.975 m² = 239 células)				Tabulação blocos (350 m² = 14 células)			
	m²	nº células	% área total	m²	nº células	% depósitos	% acum	m²	nº células	% blocos	% acum
Muito elevada	50450	2018	20.00	2275	91	38.08	38.08	275	11	78.57	78.57
Elevada	49925	1997	19.80	100	4	1.67	39.75	25	1	7.14	85.71
Moderada	89675	3587	35.56	2750	110	46.03	85.77	50	2	14.29	100.00
Reduzida ou nula	62125	2485	24.64	675	27	11.30	97.07	0	0	0.00	-----
Total	252175	10087	100.00	5800	232	97.07		350	14	100.00	

Área 4 - Ângulo de alcance 18.5°											
Classe de susceptibilidade	Área			Tabulação depósitos (5.975 m² = 239 células)				Tabulação blocos (350 m² = 14 células)			
	m²	nº células	% área total	m²	nº células	% depósitos	% acum	m²	nº células	% blocos	% acum
Muito elevada	50100	2004	21.24	2125	85	35.56	35.56	275	11	78.57	78.57
Elevada	66125	2645	28.04	250	10	4.18	39.75	25	1	7.14	85.71
Moderada	64775	2591	27.47	3075	123	51.46	91.21	50	2	14.29	100.00
Reduzida ou nula	54825	2193	23.25	350	14	5.86	97.07	0	0	0.00	-----
Total	235825	9433	100.00	5800	232	97.07		350	14	100.00	

Área 4 - Ângulo de alcance 19°											
Classe de susceptibilidade	Área			Tabulação depósitos (5.975 m² = 239 células)				Tabulação blocos (350 m² = 14 células)			
	m²	nº células	% área total	m²	nº células	% depósitos	% acum	m²	nº células	% blocos	% acum
Muito elevada	52850	2114	23.87	2000	80	33.47	33.47	275	11	78.57	78.57
Elevada	55475	2219	25.05	350	14	5.86	39.33	25	1	7.14	85.71
Moderada	58250	2330	26.30	3025	121	50.63	89.96	25	1	7.14	92.86
Reduzida ou nula	54875	2195	24.78	425	17	7.11	97.07	25	1	7.14	100.00
Total	221450	8858	100.00	5800	232	97.07		350	14	100.00	

Área 4 - Ângulo de alcance 19.5°											
Classe de susceptibilidade	Área			Tabulação depósitos (5.975 m² = 239 células)				Tabulação blocos (350 m² = 14 células)			
	m²	nº células	% área total	m²	nº células	% depósitos	% acum	m²	nº células	% blocos	% acum
Muito elevada	50550	2022	24.27	1850	74	30.96	30.96	250	10	71.43	71.43
Elevada	53575	2143	25.72	425	17	7.11	38.08	50	2	14.29	85.71
Moderada	52000	2080	24.97	3050	122	51.05	89.12	25	1	7.14	92.86
Reduzida ou nula	52150	2086	25.04	475	19	7.95	97.07	25	1	7.14	100.00
Total	208275	8331	100.00	5800	232	97.07		350	14	100.00	

Área 4 - Ângulo de alcance 20°											
Classe de susceptibilidade	Área			Tabulação depósitos (5.975 m² = 239 células)				Tabulação blocos (350 m² = 14 células)			
	m²	nº células	% área total	m²	nº células	% depósitos	% acum	m²	nº células	% blocos	% acum
Muito elevada	51950	2078	26.54	1725	69	28.87	28.87	225	9	64.29	64.29
Elevada	45650	1826	23.33	325	13	5.44	34.31	75	3	21.43	85.71
Moderada	53125	2125	27.15	3600	144	60.25	94.56	25	1	7.14	92.86
Reduzida ou nula	44975	1799	22.98	150	6	2.51	97.07	0	0	0.00	-----
Total	195700	7828	100.00	5800	232	97.07		325	13	92.86	

A figura 5.19 mostra que as classes de susceptibilidade muito elevada e moderada são as que validam a maior parte da área dos depósitos de desabamento. Com efeito, todos os modelos concentram na classe de susceptibilidade muito elevada entre 28.87% e 39.75% das áreas de depósitos. No entanto, na classe de susceptibilidade elevada existe diminuição acentuada para valores que representam, no máximo, 7.11% das áreas de depósito, sendo que o valor mais elevado é obtido no modelo criado com o ângulo de alcance de 19.5°. A maior parte dos depósitos de desabamento ocorre na classe de susceptibilidade moderada, sendo que todos os modelos criados com o ângulo de alcance \geq a 18.5° apresentam mais de 50% da área dos depósitos nesta classe. A classe de susceptibilidade reduzida ou nula valida entre 2.51% e 10.04% da área total dos depósitos, nos modelos com ângulos de alcance de 20° e 17.5°, respectivamente. Estes resultados reforçam a ideia de que a utilização do modelo gerado com o ângulo mínimo não serve o propósito da avaliação da susceptibilidade, no caso das áreas de depósito.

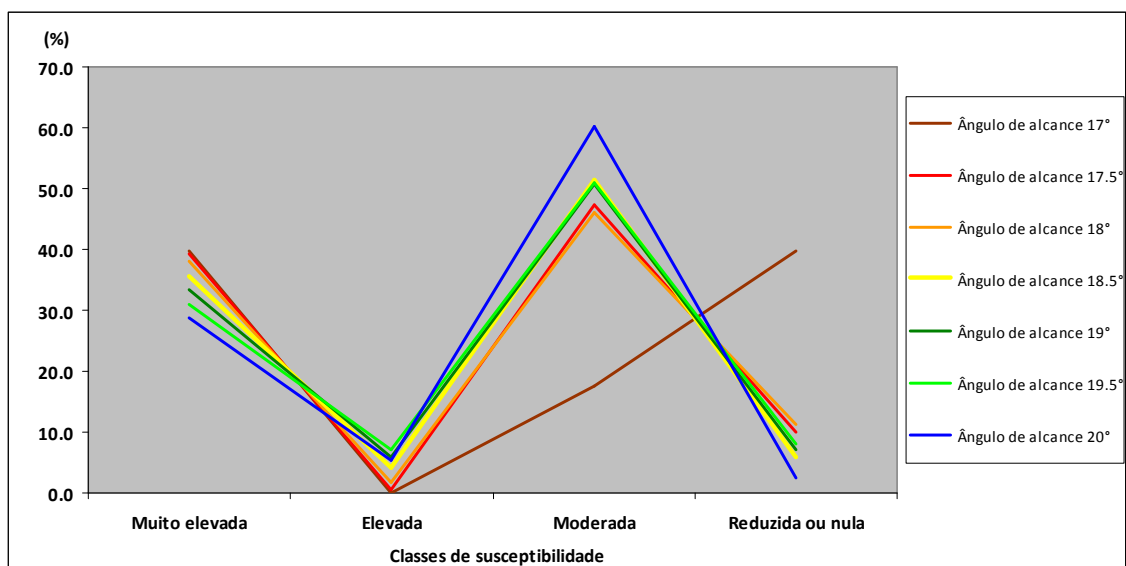


Figura 5.19 – Distribuição relativa das áreas de depósito, pelas classes de susceptibilidade e por ângulo de alcance na área teste 4.

Na figura 5.20 são apresentados os valores acumulados da distribuição relativa das áreas de depósito nas quatro classes de susceptibilidade. Uma vez que a classe de susceptibilidade elevada apresenta valores baixos, não se verifica uma subida significativa da área acumulada na passagem da classe de susceptibilidade muito

elevada para esta. Globalmente, os modelos validam mais de 85% das áreas dos depósitos, com a única excepção do modelo gerado com o ângulo de 17°.

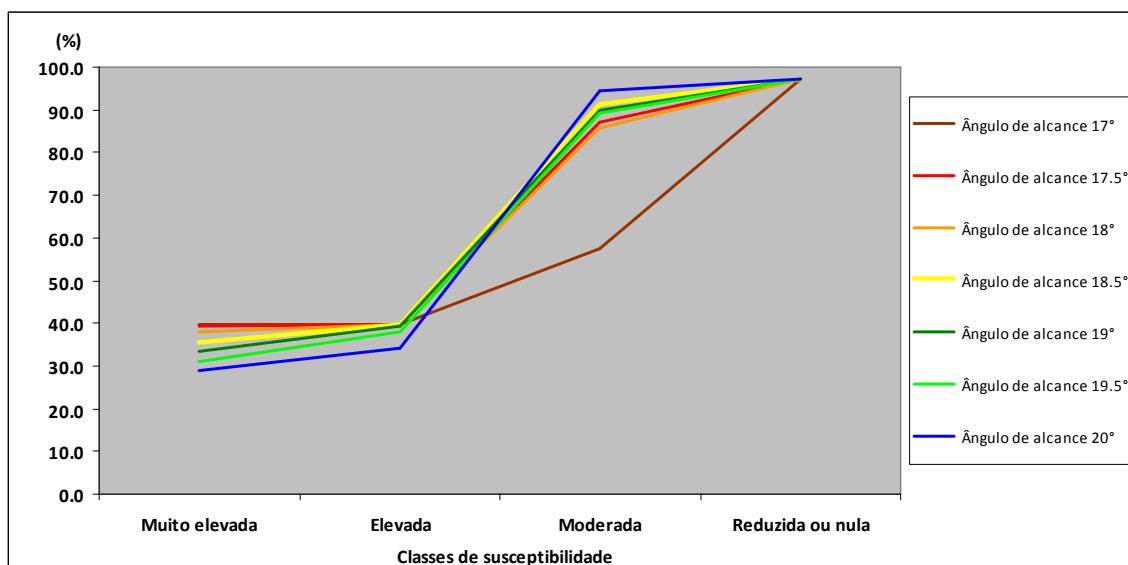


Figura 5.20 – Distribuição relativa acumulada da área de depósito, pelas classes de susceptibilidade e por ângulo de alcance na área teste 4.

A figura 5.21 mostra a distribuição relativa das áreas de blocos pelas classes de susceptibilidade, sendo evidente que, em todos os modelos gerados, a maior parte dos blocos ocorre na classe de susceptibilidade muito elevada, o que constitui um resultado bastante aceitável. Por outro lado, os blocos não ocorrem na classe de susceptibilidade reduzida ou nula nos modelos gerados com os ângulos de alcance de 17.5°, 18° e 18.5°.

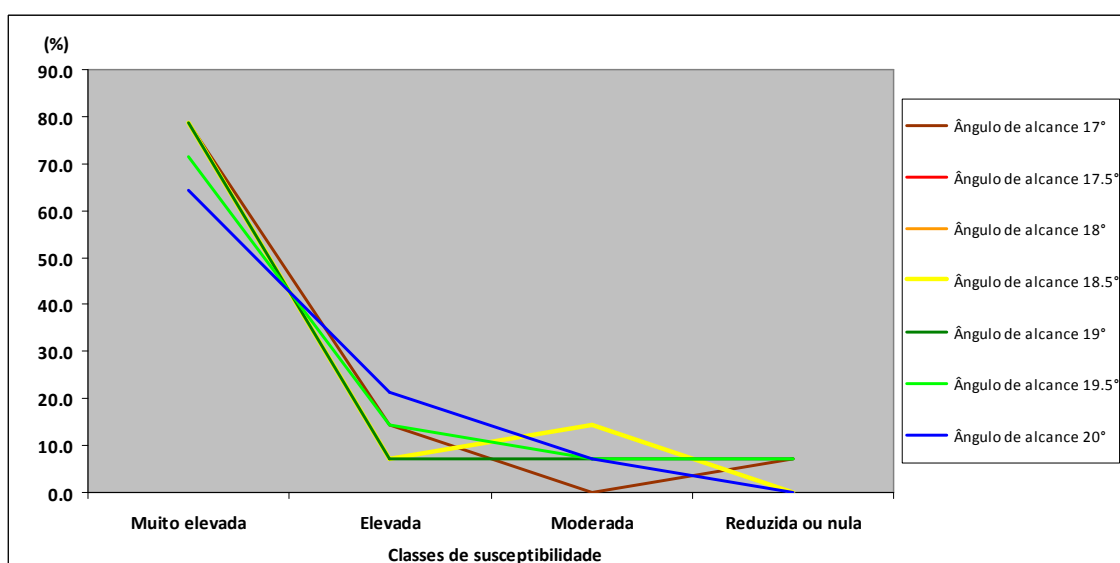


Figura 5.21 – Distribuição relativa das áreas de blocos, pelas classes de susceptibilidade e por ângulo de alcance na área teste 4.

A figura 5.22 mostra a distribuição relativa acumulada das áreas de blocos, pelas classes de susceptibilidade, em função dos ângulos de alcance considerados. Realça-se a sobreposição completa dos resultados de três modelos de propagação, correspondentes aos ângulos de alcance de 17.5°, 18° e 18.5°. Adicionalmente, a área teste 4 é a única onde, com a excepção do modelo gerado com o ângulo máximo (20°), foi possível abranger, com as áreas de propagação, a totalidade das áreas de blocos. Por último, foi a única área de teste onde foi possível abranger a totalidade das áreas de blocos em apenas três classes de susceptibilidade, situação verificada nos modelos gerados com ângulos de alcance de 17.5°, 18° e 18.5°.

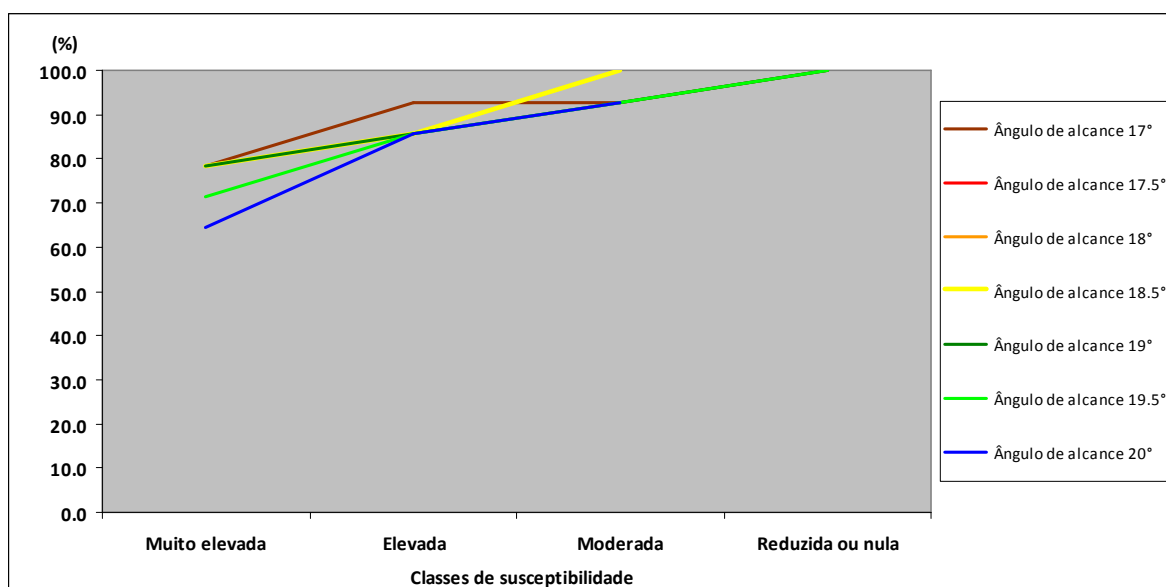


Figura 5.22 – Distribuição relativa acumulada das áreas de blocos, pelas classes de susceptibilidade e por ângulo de alcance na área teste 4.

A tabela 5.10 sintetiza os resultados obtidos para a área teste 4. Em contraste com o observado nas outras áreas teste, só a utilização do ângulo de alcance mais elevado (20°) impede a validação da totalidade dos blocos desabados.

Os modelos de propagação considerados mais adequados correspondem aos ângulos de alcance de 17.5° e 18°, que apresentam a mesma área de blocos validada na classe de susceptibilidade muito elevada (78.57%).

Tabela 5.10 – Distribuição relativa dos depósitos e dos blocos desabados por ângulo de alcance e por classe de susceptibilidade na área de teste 4.

Ângulo de alcance (°)	Classes de susceptibilidade											
	Muito elevada			Elevada			Moderada			Reduzida ou nula		
	Área da classe (%)	Depósitos (%)	Blocos (%)	Área da classe (%)	Depósitos (%)	Blocos (%)	Área da classe (%)	Depósitos (%)	Blocos (%)	Área da classe (%)	Depósitos (%)	Blocos (%)
17	20.00	39.75	78.57	22.05	0.00	14.29	20.23	17.57	0.00	37.72	39.75	7.14
17.5	19.36	39.33	78.57	21.92	0.42	7.14	34.95	47.28	14.29	23.77	10.04	0.00
18	20.00	38.08	78.57	19.80	1.67	7.14	35.56	46.03	14.29	24.64	11.30	0.00
18.5	21.24	35.56	78.57	28.04	4.18	7.14	27.47	51.46	14.29	23.25	5.86	0.00
19	23.87	33.47	78.57	25.05	5.86	7.14	26.03	50.63	7.14	24.78	7.11	7.14
19.5	24.27	30.96	71.43	25.72	7.11	14.29	24.97	51.05	7.14	25.04	7.95	7.14
20	26.54	28.87	64.29	23.33	5.44	21.43	27.15	60.25	7.14	22.98	2.51	0.00

No caso dos depósitos de desabamento, o modelo com ângulo de 17.5° apresenta valores percentuais mais elevados nas classes de susceptibilidade muito elevada, elevada e moderada. O modelo com ângulo de 18° apresenta valores mais elevados nas classes de susceptibilidade elevada e reduzida ou nula, o que determina que a escolha final recaia no modelo de propagação com ângulo de alcance de 17.5°.

4.5. Síntese

A tabela 5.11 sistematiza, para cada área teste, os ângulos de alcance mais adequados para a produção dos modelos de propagação que melhor representam a relação espacial entre as classes de susceptibilidade e a distribuição dos depósitos de desabamento e dos blocos desabados, quando estes tenham sido identificados de forma isolada.

Tabela 5.11 – Distribuição dos depósitos e dos blocos desabados por classe de susceptibilidade e por ângulo de alcance mais adequado para cada área teste.

Área teste	Ângulo de alcance mais adequado (°)	Classes de susceptibilidade							
		Muito elevada		Elevada		Moderada		Reduzida ou nula	
		Tabulação área		Tabulação área		Tabulação área		Tabulação área	
		Depósitos (%)	Blocos (%)	Depósitos (%)	Blocos (%)	Depósitos (%)	Blocos (%)	Depósitos (%)	Blocos (%)
1	13	21.78	-----	43.57	-----	32.89	-----	1.75	-----
2	24.5	0.00	0.00	19.10	53.85	80.90	46.15	0.00	0.00
3	17	28.70	15.63	18.12	18.75	18.66	9.38	20.38	9.38
4	17.5	39.33	78.57	0.42	7.14	47.28	14.29	10.04	0.00

Na área teste 1 apenas foi identificada uma área de depósito, com blocos com dimensões consideráveis ($> 3\text{m}^3$), que se encontravam relativamente próximos e concentrados, sensivelmente entre o topo e meia vertente (figura 5.23). Face à morfologia da vertente (perfil rectilíneo – côncavo) seria expectável que os blocos se pudessem propagar pelo menos até a área de rotura de declive. Contudo, o mesmo não se verifica, situação essa que poderá ser justificada, pela dimensão e sobretudo pela forma dos blocos. A dimensão não propicia o deslocamento por saltação, enquanto a forma angulosa prejudica a eventual deslocação por rolamento, originando assim que os blocos se depositem próximo da fonte.



Figura 5.23 – Distribuição de blocos de conglomerado na área de teste 1.

Por outro lado, verificou-se que, independentemente do ângulo de alcance utilizado, toda a área do depósito ficou abrangida pela área de propagação, variando apenas a sua distribuição nas diferentes classes de susceptibilidade. Durante o processo de modelação das áreas de propagação na área teste 1 verificou-se que o programa não conseguiu calcular propagações com ângulos de alcance superiores a 15.5° (devido ao declive globalmente não muito acentuado da vertente), o que seria importante para reduzir a área total de propagação e ajustá-la melhor à posição do depósito de desabamento. Desta forma, o modelo de propagação gerado com um

ângulo de alcance de 13° foi considerado como o mais adequado para a área de teste 1 (figura 5.24), uma vez que 21.78% da área de depósito se encontra na classe de susceptibilidade muito elevada e 76.46% ocorrem nas classes de susceptibilidade elevado e moderada.

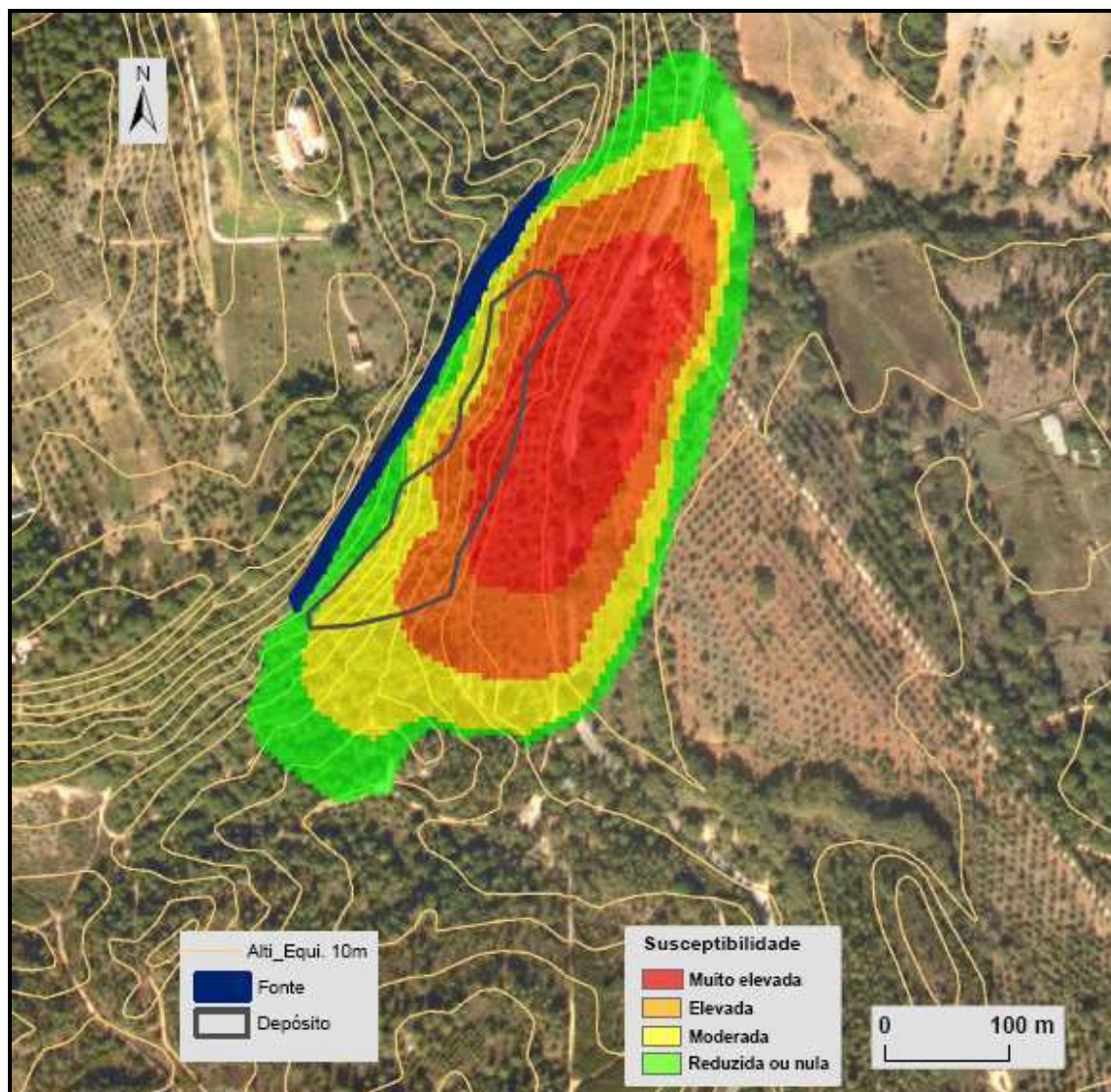


Figura 5.24 – Modelo de susceptibilidade à propagação de desabamentos na área de teste 1 (ângulo de alcance de 13°).

A área de teste 2 é aquela cuja área de propagação apresenta o ângulo de alcance mais elevado (24.5°) (figura 5.25). Nesta estão presentes depósitos de desabamento e blocos desabados isolados, sendo que a totalidade dos mesmos encontram-se concentradas nas classes de susceptibilidade elevada e moderada. No caso dos blocos isolados, existe uma distribuição relativamente equilibrada: 53.85% e 46.15%, nas classes de susceptibilidade elevada e moderada, respectivamente. No caso das áreas

de depósito, a distribuição relativa não segue a mesma tendência, uma vez que concentra 80.90% na classe de susceptibilidade moderada, ocorrendo apenas 19.10% na classe de susceptibilidade elevada.

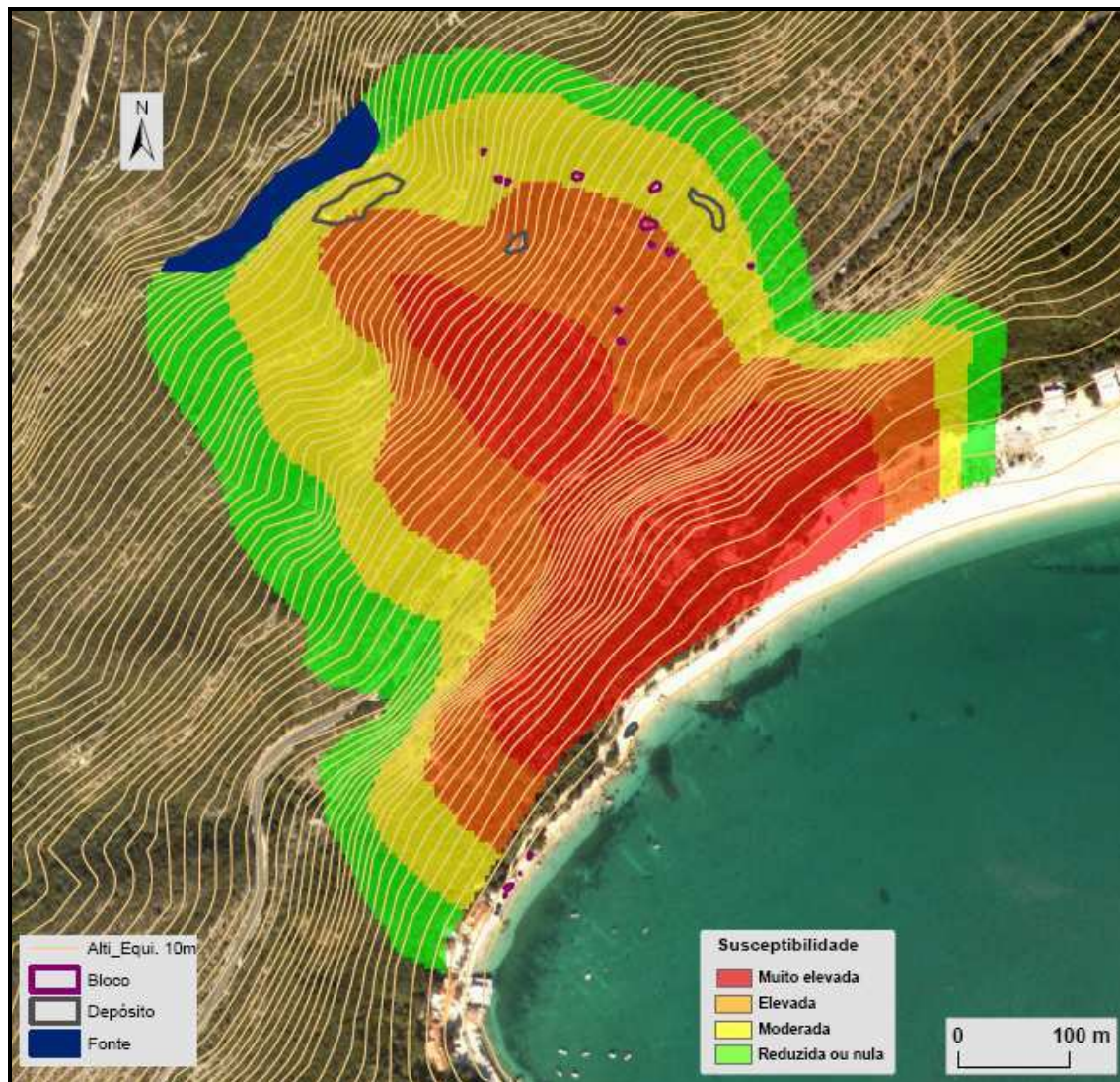


Figura 5.25 – Modelo de susceptibilidade à propagação de desabamentos na área de teste 2 (ângulo de alcance de 24.5°).

A área 3 não constitui uma área modelo em termos de propagações, uma vez que as sucessivas variações dos ângulos de alcance não permitiram ir além de uma abrangência de 85.86% da área total dos depósitos de desabamento e 53.13% da área total dos blocos desabados.

O modelo de propagação de desabamento seleccionado foi construído com o ângulo de alcance de 17° (figura 5.26). Verificou-se que, face à distribuição espacial dos depósitos de desabamento e dos blocos desabados isolados, não é possível

determinar um padrão de comportamento, quando cruzadas com as classes de susceptibilidade. A concentração de depósitos é máxima (28.70%) na classe de susceptibilidade muito elevada e apresenta valores aproximados nas classes seguintes (entre 18.12% e 20.38%). Quanto às áreas de blocos, verifica-se que as classes de susceptibilidade muito elevada e elevada apresentam os valores mais elevados (15.63% e 18.75%, respectivamente) e as restantes classes de susceptibilidade apresentam o mesmo valor de distribuição relativa (9.38%).

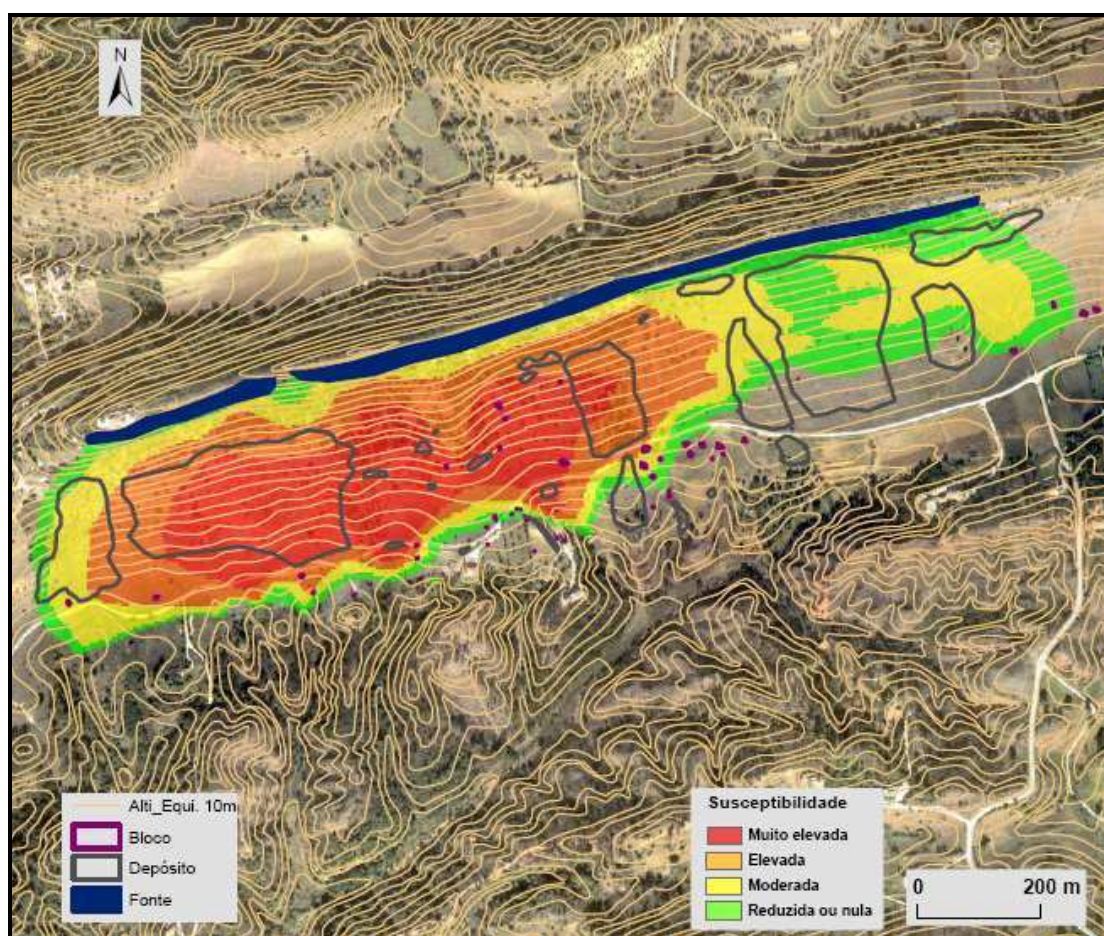


Figura 5.26 – Modelo de susceptibilidade à propagação de deslizamentos na área de teste 3 (ângulo de alcance de 17°).

A área teste 4 é aquela que apresenta os resultados mais interessantes. A utilização de um ângulo de alcance de 17.5° possibilitou abranger a totalidade da área de blocos e 97.07% da área de depósitos de deslizamento (figura 5.27). Em termos de validação cruzada com as classes de susceptibilidade, os valores obtidos na classe de susceptibilidade muito elevada reflectem um elevado grau de ajustamento,

principalmente no caso dos blocos desabados (78.57% do total concentra-se nessa classe). Adicionalmente, não são encontradas áreas de blocos na classe de susceptibilidade reduzida ou nula, o que serve o propósito da susceptibilidade de concentrar o maior número de ocorrências na menor área possível com susceptibilidade mais elevadas. Quanto às áreas de depósito desabado, os resultados da distribuição apresentam valores relativos que não permitem chegar às mesmas conclusões, uma vez que se observam duas concentrações essenciais, nas classes de susceptibilidade muito elevada (39.33%) e moderada (47.28%).

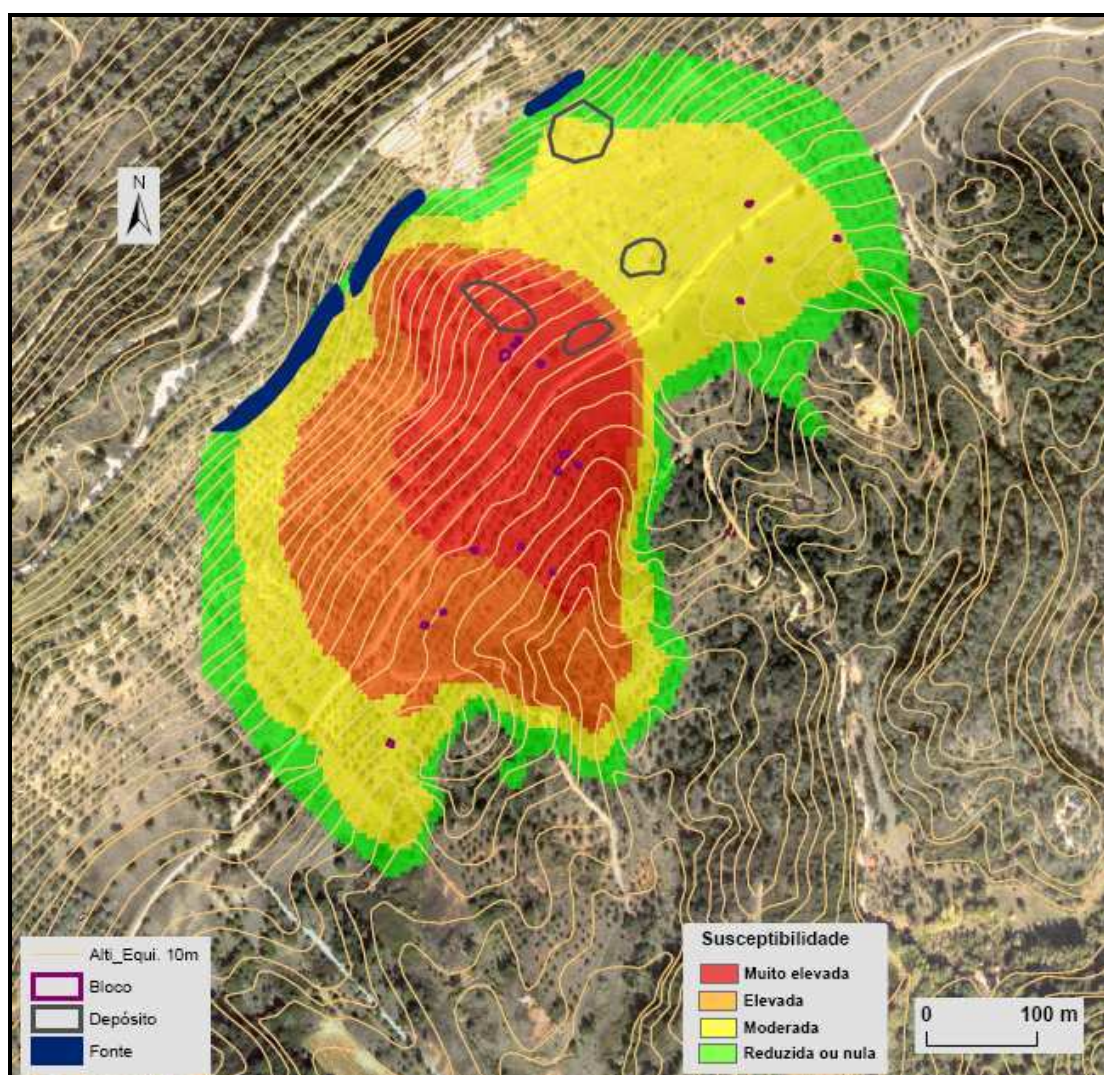


Figura 5.27 – Modelo de susceptibilidade à propagação de deslizamentos na área de teste 4 (ângulo de alcance de 17.5°).

CONCLUSÃO

O esforço dedicado à construção de um inventário de desabamentos, a utilização de uma metodologia de cartografia indirecta e a utilização de um método de análise estatística bi-variada (Valor Informativo), foi recompensado pelos resultados obtidos nos modelos de susceptibilidade à rotura por desabamento. Foram produzidos nove modelos de susceptibilidade, cuja análise dos resultados ditaram a eliminação sucessiva de seis deles, tendo sido analisados três com maior detalhe e destes escolhido apenas um, que serviu de base à fase seguinte do trabalho (modelação das propagações). O modelo escolhido (SG_2) integra as seis variáveis de predisposição consideradas (declive, exposição de vertentes, curvatura transversal de vertentes, curvatura das vertentes em perfil, litologia e ocupação do solo) e foi aquele que produziu os melhores resultados globais, sendo o que apresenta um maior equilíbrio em termos de Área Abaixo da Curva (AAC) para as taxas de sucesso e predição. Por outro lado, apesar da determinação das variáveis mais importantes para este subgrupo de fontes, os valores de AAC do modelo produzido com todas as variáveis foram sempre superiores, situação que não se verificou nos modelos produzidos com o grupo de fontes SG_1. Quanto à opção por este modelo face ao modelo gerado com o grupo completo das fontes (GTF), ela resulta essencialmente do facto deste último não poder ser validado com taxa de predição.

Quanto à propagação de desabamentos, os resultados obtidos para as quatro áreas teste demonstram que, apesar da simplicidade operacional do programa *CONEFALL 1.0*, este demonstrou ser uma ferramenta eficaz na modelação de áreas de propagação de desabamentos. Foram produzidos vinte e oito modelos de propagação, onde ficou demonstrado que não foi possível determinar um ângulo de alcance único passível de ser utilizado para toda a área da Arrábida. Para além das quatro áreas de teste consideradas e apresentadas nesta dissertação foram feitas simulações em outras áreas, que demonstraram ser inconclusivas. Ainda assim, para as quatro áreas de teste consideradas, verificou-se uma variação dos ângulos de alcance entre 12.5° (utilizado como ângulo mínimo na área de teste 1) e 27.5° (utilizado como ângulo máximo na área de teste 2). No que respeita às áreas de teste 3 e 4, não deixa de ser

curioso o facto destas apresentarem os mesmos valores de ângulo mínimo e máximo, 17° e 20°, respectivamente, situação que se pode aproximar mais a um padrão, mas bastante localizado, uma vez que estas áreas de teste, apesar de estarem associadas a afloramentos diferentes nas zonas de rotura (calcários paleogénicos da Senhora das Necessidades na área 3; calcários margosos miocénicos na área 4), encontram-se em vertentes integradas no mesmo alinhamento de relevos (serra do Louro e serra de S. Francisco) com estrutura geológica e morfologia semelhantes.

Em termos de avaliação final dos resultados produzidos para as quatro áreas de teste, conclui-se que a área 4 é aquela que apresenta os melhores resultados, quando avaliada a distribuição das áreas de blocos isolados e as áreas de depósito de desabamento, uma vez que com a utilização de um ângulo de alcance de 17.5° foi possível abranger a totalidade da área de blocos e 97.07% das áreas de depósitos de desabamento.

Considera-se que foi utilizada uma abordagem conservadora, quanto aos resultados, e desta forma menos comprometedora. Para além disso, considera-se que os resultados obtidos deverão estar claramente sobrestimados face à realidade.

A ideia base que sustentou esta dissertação era a de produzir resultados que melhor traduzissem a relação da instabilidade passada e presente e os factores que a influenciam, e a partir desta, extrapolar a instabilidade futura. No que respeita às duas realidades analisadas, entende-se que foi possível traduzir a relação passado, presente e futuro, no caso da susceptibilidade à rotura. No entanto, no que diz respeito à susceptibilidade à propagação, considera-se mais prudente afirmar que, apesar da posição actual dos marcadores de terreno utilizados (nomeadamente as fontes de desabamentos, que possibilitaram a determinação das áreas de propagação; e os blocos e depósitos, que possibilitaram determinar a sua origem), os resultados obtidos não devem ser extrapolado para uma realidade futura, pelo menos de uma forma linear.

Em termos de vias de investigação futura a jusante desta dissertação, propõe-se que sejam efectuados esforços que conduzam a uma melhor identificação das áreas de partidas de desabamentos (fontes) e na aplicação de recursos no levantamento topográfico mais rigoroso das áreas a investigar. Adicionalmente, deverão ser utilizados outros métodos e programas de modelação de desabamentos, por princípio,

mais complexos do que o utilizado, que contemplem, por exemplo, a dimensão e a geometria dos blocos e os efeitos da sua fragmentação no decurso da propagação.

Pese embora a incerteza que caracteriza a modelação da propagação de desabamentos em vertentes montanhosas, é evidente a necessidade do desenvolvimento dos estudos nesta temática, até pela relevância em termos de aplicação prática dos resultados ao nível do ordenamento e gestão do território, bem como do planeamento da emergência. No entanto, todos os resultados obtidos neste trabalho estão desagregados de qualquer aplicação prática, sendo o fruto de um trabalho de investigação independente, no âmbito da obtenção do grau de Mestre em Geografia Física e Ordenamento do Território, pelo que qualquer utilização fora deste âmbito fica desta forma ressalvada.

BIBLIOGRAFIA

- Abbruzzese, J.M.; Sauthier, C. and Labiouse, V. (2009) – Considerations on Swiss methodologies for rock fall hazard mapping based on trajectory modelling. *Natural Hazards and Earth System Sciences* (09): 1095 – 1109.
- Abdallah, C. (2010) - Spatial distribution of block falls using volumetric GIS–decision tree models. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* (12): 393 – 403.
- Abellán, A.; Vilaplana, J.M.; Martínez, J. (2006) - Application of a long-range Terrestrial Laser Scanner to a detailed rockfall study at Vall de Núria (Eastern Pyrenees, Spain). *Engineering Geology* (88): 136 – 148.
- Agliardi, F. and Crosta, G.B. (2003) - High resolution three-dimensional numerical modelling of rockfalls. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science* (40): 455 – 471.
- Alcoforado, M. J.; Andrade, E.; Neves, M.; Vieira, G. (1993) – CLIMAS LOCAIS DA ARRÁBIDA NO INVERNO. *Finisterra* XXVIII (55-56): 215-228.
- Ayalew, L.; Yamagishi, H.; Marui, H.; Kanno, T. (2005) - Landslides in Sado Island of Japan: Part II. GIS-based susceptibility mapping with comparisons of results from two methods and verifications. *Engineering Geology* (81): 432 – 445.
- Baillifard, F.; Jaboyedoff, M. and Sartori, M. (2003) – Rockfall hazard mapping along a mountainous road in Switzerland using a Gis-based parameter rating approach. *Natural Hazards and Earth System Sciences* (03): 431 – 438.
- Bi, J.; Bennett, K. P (2003) – Regression Error Characteristic Curves. *Proceedings of the Twentieth International Conference on Machine Learning (ICML-2003)*. Washington DC.

- Blahut, J.; Van Westen, C. J.; Sterlacchini, S. (2010) - Analysis of landslide inventories for accurate prediction of debris-flow source areas. *Geomorphology* (119): 36-51.
- Cascini, L. (2008) – Applicability of landslide susceptibility and hazard zoning at different scales. *Engineering Geology*, (102): 164 – 177.
- Castellanos Abella, E. A. (2008) - Provincial landslide risk assessment. In: Castellanos Abella, E.A., Multi-scale landslide risk assessment in Cuba, Utrecht University, Utrecht, ITC Dissertation 154, pp. 101–152.
- Chung, C-J. F.; Fabbri, A. G. (2003) –Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. *Natural Hazards*. (30): 451 – 472.
- Copons, R.; Vilaplana, J.M. (2008) - Rockfall susceptibility zoning at a large scale: From geomorphological inventory to preliminary land use planning. *Engineering Geology* (102): 142 – 151.
- Corominas, J. (1993) – The angle of reach as a mobility index for small and large landslides. *Canadian Geotechnical Journal*. (33) 125 – 132.
- Crispim, J.A. (1999) – Seismotectonic versus man-induced morphological changes in a cave on the Arrábida chain (Portugal). *Geodinamica Acta* (Paris): 135-142.
- Crosta, G.B. and Agliardi, F. (2003) - A methodology for physically based rockfall hazard assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences* (3): 407 – 422.
- Cruden, D. M. (1991) – A simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*. (43): 27-29.
- Cruden, D. M. e Varnes, D. J. (1996) – Landslide Types and Processes. In Turner, A. K., Shuster, R. L. (eds.). *Landslides, Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board, Special Report 247, National Academy Press, Washington D.C.

- Dorren, L., K., A. (2003) – A review of rockfall mechanics and modelling approaches. *Progress in Physical Geography* (27, 1): 69 – 87.
- Fabbri, A. G.; Chung, C. F.; Napolitano, P.; Remondo, J.; Zêzere, J. L. (2002) –Prediction rate functions of landslide susceptibility applied in the Iberian Peninsula. *Risk Analysis* (III): 703 – 718.
- Fell, R.; Corominas, J.; Bonnard, C.; Cascini, L.; Leroi, E.; Savage, W.Z.; on behalf of the JTC-1 Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes (2008) - Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning. *Engineering Geology* (102): 99 – 111.
- Garcia, R. A. C. (2002) – *Avaliação do risco de movimentos de vertente na depressão da Abadia* (Torres Vedras). Tese de mestrado em Geografia Física e Ambiente, Universidade de Lisboa, 140 pp.
- Garcia, R. A. C.; Zêzere, J.L. e Cruz de Oliveira, S. (2007) – A importância do processo de classificação de dados na cartografia: um exemplo na cartografia de susceptibilidade a movimentos de vertente. *Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos*, Vol. V, APGeom, Lisboa: 265-279.
- Glade, T. & Crozier, M. J. (2005) - The nature of landslide hazard and impact. in: Glade, T., Anderson, M. & M. Crozier (Eds): *Landslide hazard and risk* - Wiley, Chichester: 43-74.
- Gorsevski, P.V.; Gessler, P. E.; Foltz, R.B.; Elliot, W.J. (2006) – Spatial Prediction of Landslide Hazard Using Logistic Regression and ROC Analysis. *Transactions in GIS*. 10 (3): 395 – 415.
- Guzzetti, F. (2005) – *Landslide hazard and Risk Assessment*. Dissertation zur erlangung des doktorgrads (Dr. Rer. Nat.) der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Italy.

- Guzzetti, F.; Crosta, G.; Detti, R. and Agliardi, F. (2002) – STONE: a computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls. *Computer & Geosciences* (28): 1079 – 1093.
- Highland, L. M. e Bobrowsky, P. (2008) – *The landslide handbook – A guide to understanding landslides*. U.S. Geological Survey, Reston, Virgínia.
- Jaboyedoff, M. (2003) - *CONEFALL 1.0, User's Guide. OPEN-REPORT – SOFT – 01*. in QUANTERRA - INTERNATIONAL INDEPENDENT CENTER OF CLIMATE CHANGE IMPACT ON NATURAL RISK ANALYSIS IN MOUNTAINOUS AREA.
On line: http://www.quanterra.org/Manual_conefall.pdf
- Jaboyedoff, M. and Labiouse, V. (2003) - Preliminary assessment of rockfall hazard based on GIS data. ISRM 2003 – *Technology roadmap for rock mechanics*. South African Institute of Mining and Metallurgy.
- Jaboyedoff, M. and Labiouse, V. (2011) – Preliminary estimation of rockfall runout zones. *Natural Hazards and Earth System Sciences* (11): 819 – 828.
- Jaboyedoff, M.; Baillifard, F.; Marro, C.; Philippossian, F. and Rouiller, J-D. (1999) – *DETECTION OF ROCK INSTABILITIES: MATTEROCK METHODOLOGY*. Joint Japan-Swiss Scientific on Impact Load by Rock Falls and Desing of Protection Structures. Kanazawa, Japan 4 – 7 October.
- Julião, R. P. (coord); Nery, F.; Ribeiro, J. L.; Castelo Branco, M.; Zêzere, J. L. (2009) – *Guia metodológico para a produção de cartografia municipal de risco e para a criação de sistemas de informação geográfica (SIG) de base municipal* – ANPC, DGOTDU, IGP. 91 p.
- Kullberg, J. C.; Terrinha, P.; Pais, J.; Reis, R. P. & Legoinha P. (2006) – Arrábida e Sintra: dois exemplos de tectónica pós-rifting da Bacia Lusitaniana. *In Geologia de Portugal no contexto da Ibéria* (R. Dias, A. Araújo, P. Terrinha & J. C. Kullberg, Eds.). Universidade de Évora: 369 - 396.

- Kullberg, M. C., Kullberg, J. C. e Terrinha, P. (2000) - Tectónica da Cadeia da Arrábida. In Tectónica das regiões de Sintra e Arrábida. *Memórias Geociências*. Museu Nacional de História Natural. Universidade de Lisboa, nº 2: 35-84.
- Lan, H.; Martin, C.D.; Zhou, C.; Lim, C.H. (2010) - Rockfall hazard analysis using LiDAR and spatial modelling. *Geomorphology* (118): 213 – 223.
- Loye, A.; Jaboyedoff, M. and Pedrazzini, A. (2009) – Identification of potential rockfall source areas at a regional scale using a DEM- based geomorphometric analysis. *Natural Hazards and Earth System Sciences* (09): 1643 – 1653.
- Meneses, B. M. C. S. (2011) - *SUSCEPTIBILIDADE E RISCO DE MOVIMENTOS DE VERTENTE NO CONCELHO DE TAROUCA*. Tese de Mestrado em Geografia Física e Ordenamento do Território. Instituto de Geografia e Ordenamento do Território da Universidade de Lisboa, 115 pp.
- Pais, J. e Legoinha, P. (2000) – Gruta da Figueira Brava (Arrábida): Geological Setting. *Separata do Tomo XXXVIII das Memórias da Academia das Ciências de Lisboa*: 69 – 84.
- Pantelidis, L.; Kokkalis, A. (2011) - Designing passive rockfall measures based on computer simulation and field experience to enhance highway safety. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* (48): 1369 – 1375.
- Pantha, B. R.; Yatabe, R. and Bhandary, N. P. (2008) - GIS-based landslide susceptibility zonation for roadside slope repair and maintenance in the Himalayan region. *On line*: <http://www.geosocindia.org/episodes/www/backissues/314/384-391%20GIS%20new.pdf>
- Paronuzzi, P. (2008) – Rockfall-induced block propagation on a soil slope, northern Italy. *Environment Geology* (58): 1451 – 1466.

- Pedro, J. G. (1998) – *A vegetação e a flora da Arrábida*. 2 Ed. Instituto da Conservação da Natureza. Lisboa.
- Piedade, A. (2009) – *Modelação especial em Sistemas de Informação Geográfica da susceptibilidade a deslizamentos na área de Lousa – Loures*. Dissertação de Mestrado em Gestão do Território, área de especialização em Detecção Remota e Sistemas de Informação Geográfica. F. C. S. H. – Universidade Nova de Lisboa.
- Popescu, M. E. (1994) – A suggested method for reporting landslide causes. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*. (50): 71-74.
- Ribeiro, O. (1968) – Excursão à Arrábida. *Finisterra*, Lisboa, III (6): 257-273.
- Ribeiro, O. (2004) – *A Arrábida Esboço Geográfico*. 3 Ed. Fundação Oriente e Câmara Municipal de Sesimbra.
- Santos, P.; Tavares, A. (2010) - Modelação de processos de queda de blocos em vertentes na região de Alvaiázere; dois estudos caso. *SIMPÓSIO MODELAÇÃO DE SISTEMAS GEOLÓGICOS. Homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho*.
On line: http://riskam.ul.pt/disaster/images/pdf/santos_tavares_2011.pdf
- Soeters, A. S. e Van Westen, C. J. (1996) – Slope Instability Recognition, Analysis and Zonation. In Turner, A. K. e Schuster, R. L. (eds.), *Landslides, Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board. Special Report 247. National Academy Press. Washington D. C.
- Spadari, M.; Giacomini, A.; Buzzi, O.; Fityus, S.; Giani, G.P. (2012) - In situ rockfall testing in New South Wales, Australia. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* (49): 84 – 93.
- Van Den Eeckhaut, M.; Reichenbach, P.; Guzzetti, F.; Rossi, M. and Poesen, J. (2009) - Combined landslide inventory and susceptibility assessment based on different mapping units: an example from the Flemish Ardennes, Belgium. *Natural Hazards Earth System Sciences* (9): 507 – 521.

- Working Party On World Landslide Inventory, UNESCO (1993) - *Multilingual landslide glossary*. International Geotechnical Societies, Canadian Geotechnical Society (ed.), Richmond, BiTech Publishers Ltd..
- Yin, K. L.; Yan, T. Z. (1988) – Statistical prediction models for slope instability of metamorphosed rocks. Bonnard, C. (ed.), *Landslides*. Proceedings of the Fifth International Symposium on Landslides (2). Balkema. Rotterdam: 1269–1272.
- Zêzere, J. L. (2002) – Landslide susceptibility assessment considering landslide typology. A case study in the area north of Lisbon (Portugal). *Natural Hazards and Earth System Sciences*. (2): 73-82.
- Zêzere, J. L. (2005) – *Dinâmica de vertentes e riscos geomorfológicos*. Relatório n.º 41. Área de Geografia Física e Ambiente. Centro de Estudos Geográficos, Lisboa.
- Zêzere, J. L.; Faleh, A.; Sadiki, A.; Garcia, R.A.C.; Cruz de Oliveira, S. (2009) - Modelação da susceptibilidade a deslizamentos na bacia do Oued Sra (Rif central, Marrocos) com métodos estatísticos bi-variados. *Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos*, Vol. VI, APGeom, Braga: 203 -210.
- Zêzere, J. L.; Reis, E.; Garcia, R.; Cruz de Oliveira, S.; Rodrigues, M. L.; Vieira, G. e Ferreira, A. B. (2004) – Integration of spatial and temporal data for the definition of different landslide hazard scenarios in the area north of Lisbon (Portugal). *Natural Hazard and Earth System Sciences*. (4): 133-146.